

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydrotechniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže Cogotí v Chile

Water Management Solution of the Cogotí Dam in Chile

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur

Leden 2019

Bc. Prokop Šindlar



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Šindlar Jméno: Prokop Osobní číslo: 423715

Zadávací katedra: 142 - Katedra hydrotechniky

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže Cogotí v Chile

Název diplomové práce anglicky: Water Management Solution of the Cogotí Dam in Chile

Pokyny pro vypracování:

Cílem diplomové práce je zpracování vodohospodářského řešení nádrže Cogotí, která se nachází v Chile v provincii Limarí. Nádrž má celkový objem 150 mil. m³ a je napájena dvěma hlavními přítoky, kterými jsou vodní toky Cogotí a Combarbalá, plocha povodí je přibližně 1700 km². Nádrž Cogotí byla dokončena v roce 1940 a od té doby slouží především jako zdroj závlahové vody. Diplomová práce se zaměří na vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže s využitím řad průměrných měsíčních průtoků a vyhodnocením spolehlivosti dodávek vody. Součástí řešení bude orientační stanovení hydroenergetického potenciálu lokality. Dále diplomová práce posoudí vliv realizace dalších plánovaných nádrží v povodí nádrže Cogotí na její vodohospodářskou funkci.

Seznam doporučené literatury:

Patera, A., Nacházel, K., Fošumpaur, P.: Nádrže a vodohospodářské soustavy. Vydavatelství ČVUT, Praha 2002.
Votruba, L., Broža, V.: Hospodaření s vodou v nádržích. SNTL/ALFA, Praha 1980.

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur

Datum zadání diplomové práce: 3.10.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

26.10.2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

V Praze, dne

Bc. Prokop Šindlar

Poděkování

Rád bych poděkoval především panu doc. Fošumparovi za odborné vedení mé práce. Dále děkuji společnosti ŠINDLAR s.r.o. za technické zázemí a panu správci vodního díla Cogotí za umožnění prohlídky. Děkuji celé své rodině za podporu nejen při psaní této diplomové práce, ale po celou dobu mého studia.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na vodohospodářské řešení zásobní funkce a vyhodnocení spolehlivosti dodávek vody nádrže Cogotí. Součástí řešení je orientační stanovení hydroenergetického potenciálu lokality. Dále diplomová práce posuzuje vliv realizace dalších plánovaných nádrží v povodí nádrže Cogotí na celkovou vodohospodářskou funkci soustavy ve třech manipulačních scénářích.

Úloha je vyřešena sestavením simulačního modelu vodohospodářské soustavy nádrží a vyhodnocením sedmi možných variant dvou stávajících vodních děl (Valle Hermoso a Cogotí) a realizace tří potenciálních vodních děl (Murallas Viejas, Curcita, Tranca). Valle Hermoso je v procesu výstavby a bude dokončeno v roce 2019.

Provedený výpočet ukázal, že současná zabezpečení dodávky vody z nádrže Cogotí je 90,8 %. Dále byl vyhodnocen dopad výstavby potenciálních vodních děl na zabezpečení nádrže Cogotí s výsledným možným poklesem až na 71,3 %. Energetický potenciál vodního díla Cogotí je stanoven na základě výstupů bilance vody v nádrži. Je posouzen vliv výstavby potenciálních vodních nádrží na možnou výrobu elektrické energie, který je negativní až o 22 %.

Podarilo se nasimulovat nejefektivnější využití vody v povodí a v jednotlivých variantách řešení doporučit následující postup výstavby potenciálních profilů nádrží. Nejvýhodnějším třetím profilem pro výstavbu je nádrž Curcita. Výstavba vodního díla Tranca se v žádné variantě nejeví být výhodná.

Klíčová slova

zabezpečení, hydroenergetický potenciál, vodohospodářské řešení, soustava nádrží, simulační model, závlahy, Chile, Cogotí, spolehlivost dodávek vody, zásobní funkce, vodní dílo

Abstract

The diploma thesis is focused on the water management solution of the storage function and evaluation of the reliability of the water supply of Cogotí reservoir. Part of the solution is the indicative determination of the hydroenergetic potential of the site. The thesis also assesses the impact of the implementation of other planned reservoirs in the catchment area of Cogotí reservoir on the overall water management function of the system in three regulation scenarios.

The role is solved by compiling a simulation model of the water management system of the reservoirs and evaluating the seven possible combinations of two existing hydraulic structures (Valle Hermoso and Cogotí) and the realization of three potential hydraulic structures (Murallas Viejas, Curcita, Tranca). Valle Hermoso is under construction and will be completed in 2019.

The calculation has shown that the current water supply reliability from the Cogotí reservoir is 90.8%. In addition, the impact of the construction of potential hydraulic structures on the water supply reliability of the Cogotí reservoir was assessed, pointing out the possible drop to 71.3%. The hydroenergetic potential of the Cogotí reservoir is determined on the basis of the water balance outputs of the reservoir. The impact of the construction of potential hydraulic structures on the possible production of electricity is negative up to 22%.

The thesis has simulated the most efficient water use scenario in the river basin and has recommended the following procedure for the construction of other potential reservoirs in individual solution combinations. The most beneficial hydraulic structure recommended for the next construction is the Curcita reservoir. The construction of the Tranca reservoir does not appear to be beneficial in any assessed version.

Key words

water supply reliability, hydroenergetic potential, water management solution, system of reservoirs, simulation model, irrigation, Chile, Cogotí, water supply reliability, storage function, hydraulic structure

OBSAH

1. Úvod	3
1.1. Popis řešené lokality	3
1.2. Popis vodního díla	5
1.3. Specifikace cílů diplomové práce	8
2. Vstupní údaje	9
2.1. Hydrologická data	9
2.2. Podkladové mapy	10
2.3. Studie vodního díla Valle Hermoso	10
3. Zvolené metodické postupy	10
3.1. Analýza hydrologických dat	11
3.1.1. Odvození reálné průtokové řady	11
3.1.2. Odvození charakteristických čar přehrady Cogotí	13
3.1.3. Odvození průsaku	14
3.1.4. Odvození výparu	16
3.1.5. Odběr vody pro závlahové účely	17
3.1.6. Minimální zůstatkový průtok	19
3.2. Hydrologická analogie	21
3.2.1. Ověření hydrologické analogie v měrných profilech na vodních tocích Cogotí a Pama	22
3.3. Batygrafické čáry plánovaných vodních děl v povodí	25
3.4. Výpočet spolehlivosti dodávky vody	26
3.5. Vodohospodářské řešení zásobní funkce přehrady Cogotí	28
3.5.1. Vliv nádrží v povodí na zásobní funkci vodního díla Cogotí	28
3.5.1.1. Definování systému na vodohospodářské soustavě	28
3.5.1.2. Podmínky manipulačního řízení	29

3.5.1.3. Výpočet soustavy nádrží.....	30
3.6. Energetické využití vodního díla Cogotí	32
4. Analýza současného stavu vodního díla Cogotí	33
4.1. Hydrologický vývoj v profilu nádrže Cogotí.....	35
4.2. Hydroenergetický potenciál vodního díla.....	36
4.3. Variantní vyhodnocení dopadů na zásobní funkci nádrže Cogotí	37
4.3.1. Plánovaná vodní díla v povodí nádrže Cogotí.....	38
4.3.2. Posouzení základního manipulačního scénáře na vodních dílech.....	40
4.3.3. Stanovení manipulačního scénáře při dodržení limitní zabezpečení	44
4.3.4. Stanovení manipulačního scénáře zajišťujícího rovnováhu mezi zabezpečeními vodních děl	47
5. Závěr.....	49
Citovaná literatura	52
Seznam obrázků.....	54
Seznam tabulek.....	54
Seznam grafů	55

1. ÚVOD

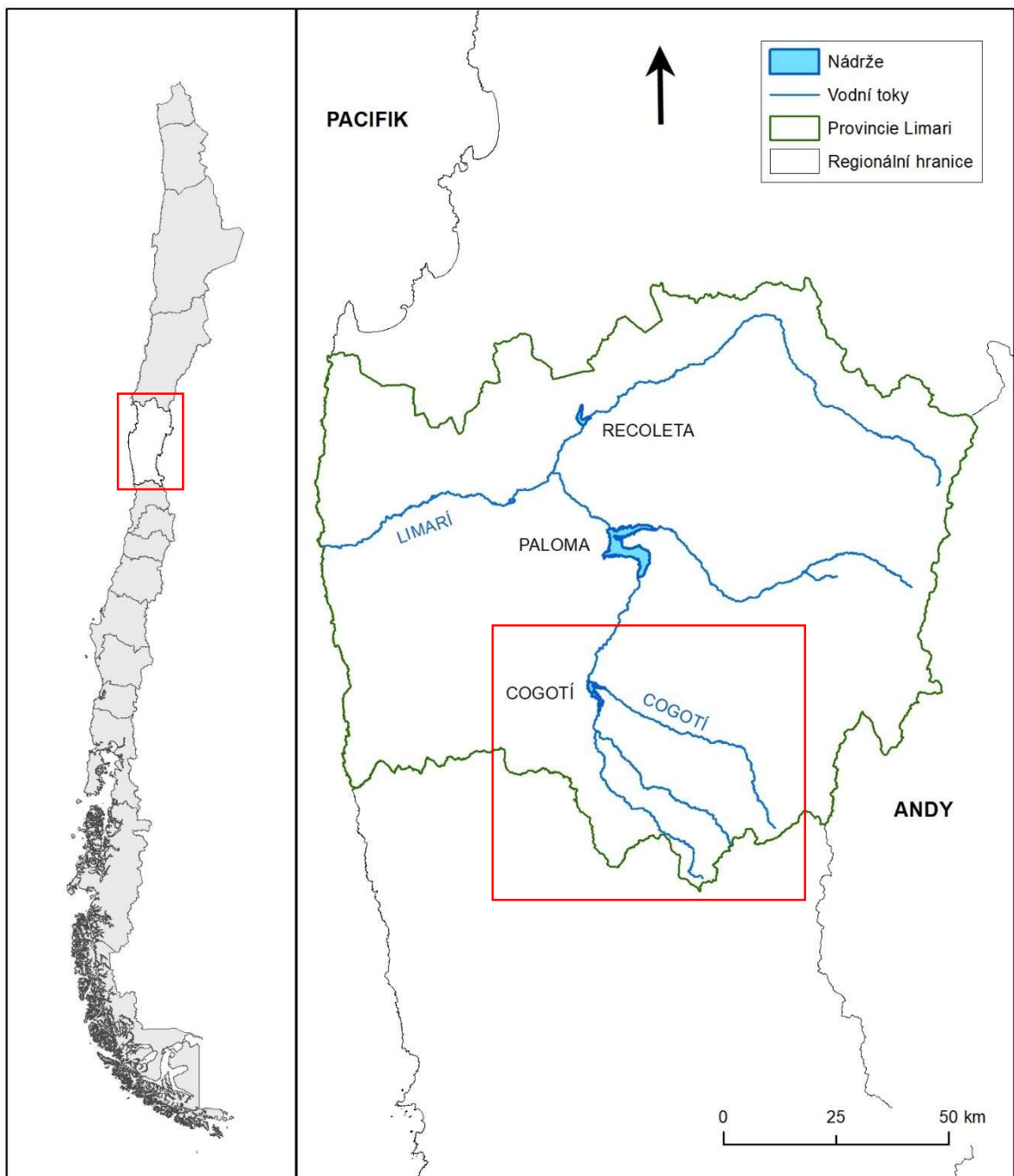
Základním motivem diplomové práce je posouzení zásobní funkce závlahové přehrady v semiaridní oblasti Chile v provincii Limarí. V minulosti došlo vícekrát k jejímu úplnému vyprázdnění, a to i na dlouhé časové úseky, protože suché období v místních podmínkách se může projevat i desítky let. Vodní toky Cogotí a Combarbalá, které dotují zásobní prostor nádrže, se vyznačují značně rozkolísaným hydrologickým režimem, kdy ve vodném období jimi protékají i stovky $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a v suchých letních měsících může dojít až k jejich úplnému vyschnutí.

Vzhledem k suchému klimatu je zemědělství v dané oblasti téměř výhradně závislé na přístupu k závlahové vodě. Tato skutečnost motivovala zemědělce v povodí přehrady Cogotí k návrhu čtyř profilů závlahových nádrží, které by mohly potřebné odběry zajistit. Jedním z výstupů diplomové práce je posouzení vlivu těchto potenciálních vodních děl na zásobní funkci nádrže Cogotí. Hlavním cílem práce je návrh možné manipulace systému nádrží takovým způsobem, aby zavlažovaná plocha a spolehlivost dodávek vody byla maximálně efektivní ve všech sedmi možných variantách realizace.

V návaznosti na vyhodnocení soustavy nádrží v povodí bude dále posouzeno možné využití hydroenergetického potenciálu nádrže Cogotí.

1.1. POPIS ŘEŠENÉ LOKALITY

Zájmová lokalita se nachází na jihozápadě amerického kontinentu, semiaridní oblasti regionu Coquimbo v povodí řeky Limarí v Chile (viz Obr. 1.1). Významná část chilského území je do značné míry seismicky aktivní. Příčinou je kontinentální drift, který způsobuje tření litosférických desek Nazca a Jižní Ameriky. (1)



Obr. 1.1 – Lokalizace zájmové oblasti vyznačené červeným polem

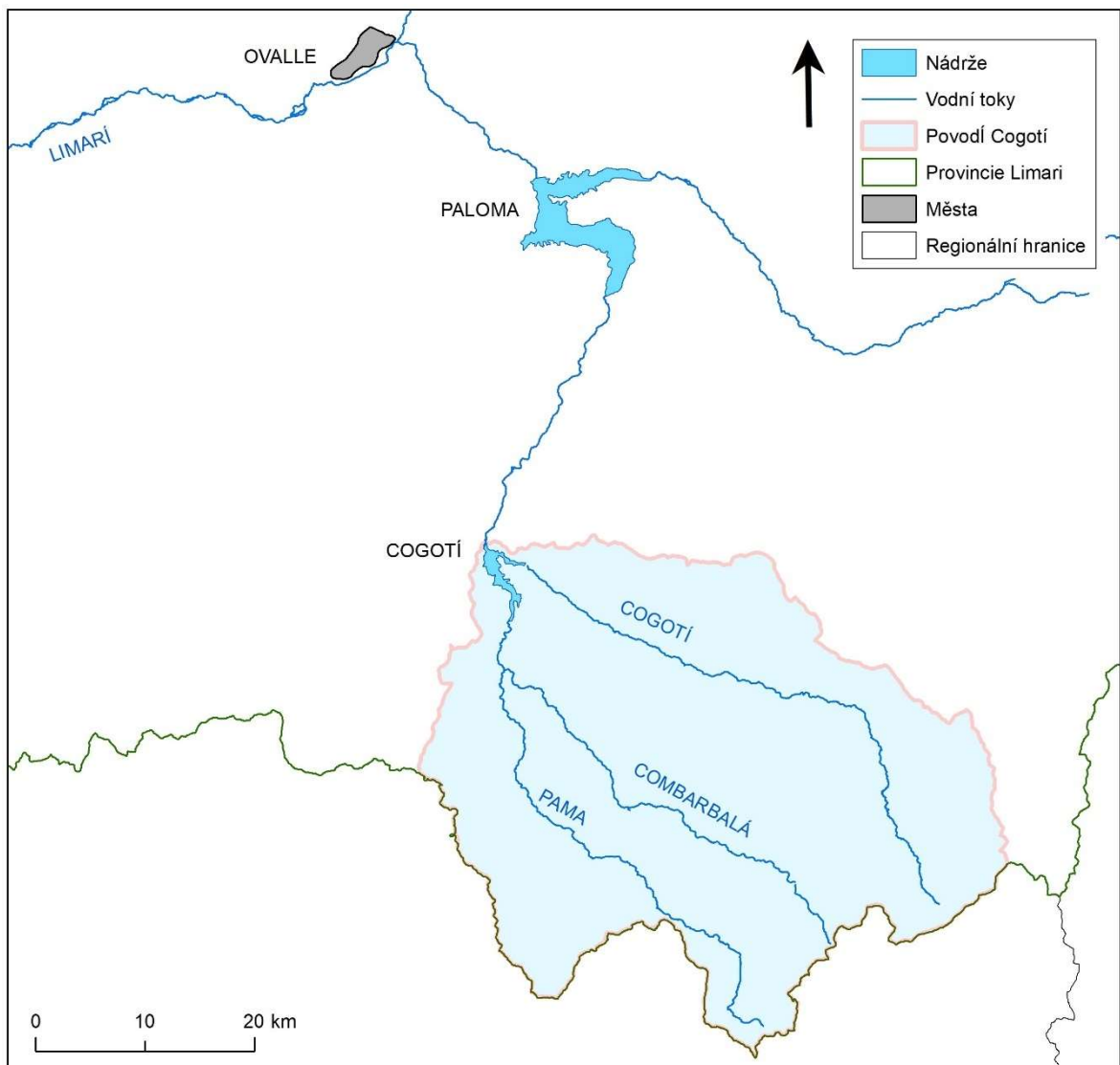
Vodní toky dotující povodí řeky Limarí, pramení na západní straně And v úrovni třicáté první rovnoběžky. V regionu Coquimbo ve vzdálenosti 200 km od pobřeží dosahuje pohoří And nadmořské výšky až 5000 m n. m. V chladném období v oblastech přibližně nad 2500 m n. m. dochází k akumulaci sněhu. Horní části povodí jsou proto většinou dotovány především tajícím sněhem během pozdního jara a léta. Podnební podmínky lze rozdělit na dva časové úseky od dubna do září, kdy dochází k občasným srážkám a teploty se pohybují mezi -8° až 20°C a od října do března, kdy je oblast většinou

bez srážek a teploty se pohybují mezi 5° až 32 °C. Z důvodu suchého klimatu je zemědělství téměř výhradně závislé na umělém zavlažování. (2)

Vodní toky dotované táním sněhu v semiaridních regionech jsou systémy vysoce citlivé na klimatickou změnu. Zpracované studie poukazují na možný nárůst teploty během 21. století o 3 až 4 °C a snížení srážek o 10 až 30 %. (3) Změny klimatu mohou vést k dramatickému ovlivnění hydrologického režimu vodních toků a omezit dostupnost zásoby povrchové i podzemní vody, což může mít vážné následky na zemědělskou produktivitu regionu. Za účelem zajištění vody pro závlahy 50 000 ha v povodí řeky Limarí a potřeby vody 100 000 obyvatel města Ovalle i menších okolních měst, byly v první polovině dvacátého století postaveny přehrady Paloma, Recoleta a Cogotí. (4)

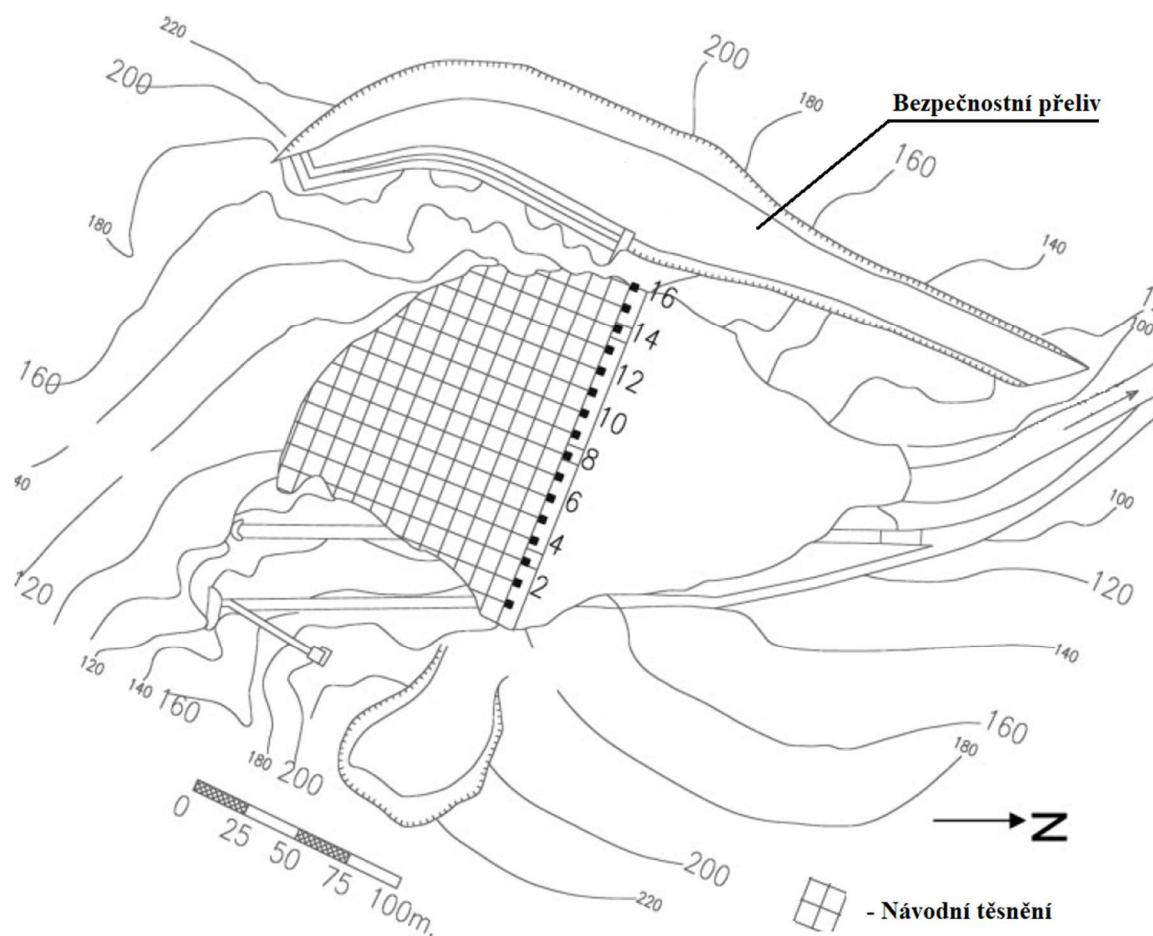
1.2. POPIS VODNÍHO DÍLA

Přehrada Cogotí se nachází na soutoku řeky Cogotí a Combarbalá v provincii Limarí v Chile, přibližně 65 km jižně od města Ovalle, (viz Obr. 1.2), v nadmořské výšce 575 m n. m. Zásobní objem nádrže v koruně bezpečnostního přelivu činí 150 milionů m³. Boční bezpečnostní přeliv s kapacitou 5 000 m³.s⁻¹ je vysekán do skály na levém břehu. Jedná se o rockfillovou přehradu dokončenou v roce 1940. Délka hráze je 160 m s maximální výškou 82,7 m a šířkou v koruně 8 m. (1) Na vodním díle jsou osazeny 3 základové výpustě DN 700 s kapacitou jedné výpustě při maximální tlačné výšce 4,5 m³.s⁻¹. Maximální výška zahrnuje 20 m ze dna nádrže k hraně nátoky spodní výpustě, vymežujícím tak mrtvý prostor nádrže využitelný k retenci splavenin. Plocha povodí k profilu hráze je 1 601 km².



Obr. 1.2 – Přehledná situace

Návodní těsnění zobrazené v přehledné situaci (viz Obr. 1.3) je z betonových desek o rozměru 10 x 10 m. Dilatační spáry jsou těsněny měděným plechem o tloušťce 1,5 mm. Dodatečně byly spáry naplněny asfaltovou směsí. (1)



Obr. 1.3 – Přehledná situace přehrady Cogotí (1)

V letech 2002 – 2004 byl na koruně bezpečnostního přelivu o délce 150 m vybudován pohyblivý vakový uzávěr (viz Obr. 1.4) o výšce 2,8 m (5), za účelem navýšení maximálního zásobního objemu. Vak je v případě potřeby tlakován vzduchem. Doba nutná k zajištění maximálního hrazení je přibližně 45 minut. (6)



Obr. 1.4 – Bezpečnostní přeliv s pohyblivým vakovým uzávěrem

Za dobu své funkce přehrada Cogotí zaznamenala sedání vlivem seismické aktivity o 1,2 m. Následkem došlo k poruše návodního betonového těsnění, nicméně celková stabilita vodního díla byla neohrožena. (1) Rockfillové přehrady charakterizuje vysoká pevnost ve smyku, nulový pórový tlak a nízké sedání při seismickém zatížení. Z toho důvodu jsou rockfillové přehrady vhodným typem konstrukce v seismicky aktivních oblastech. (7)

Minimální zůstatkový průtok na vodním díle není stanoven. V současné době je zajišťován pouze průsaky podloží a tělesem hráze v kombinaci s průtokem určeným pro přehradu Paloma přibližně 25 km pod přehradou Cogotí. (6)

1.3. SPECIFIKACE CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Na základě získaných dat bude vytvořen simulační model, který porovnáme se získanými údaji o chronologickém průběhu objemu v nádrži a výsledné zabezpečení dodávky vody.

Dále do modelu zahrneme potenciální vodní díla v povodí a vytvoříme simulační model soustavy nádrží. Výpočet bude proveden bilancí hodnot přítoku, odtoku a ztrát analyzovaných na základě dostupných dat.

Simulačním modelem budou vyhodnoceny kombinační scénáře potenciálně realizovatelných vodních děl a variantním řešením způsobů manipulace s vodou v nádrži. Výstupem bude dosažená zabezpečenost požadovaného odběru v jednotlivých scénářích.

Získané informace o odtoku z nádrže a příslušné tlačné hladiny v daném časovém kroku, budou využity ke stanovení orientačního hydroenergetického potenciálu.

2. VSTUPNÍ ÚDAJE

Zpracování řešení dané problematiky vyžaduje především spolehlivá hydrologická data a údaje o požadavcích na odběry v zájmovém území. K odvození základních charakteristik nádrží byly využity vrstevnicové mapové podklady.

V rámci terénního průzkumu byly dále získány údaje o požadavcích na zavlažované plochy v jednotlivých povodích (viz Tabulka 2.1). Tyto informace byly získány od správce přehrady Cogotí. (6)

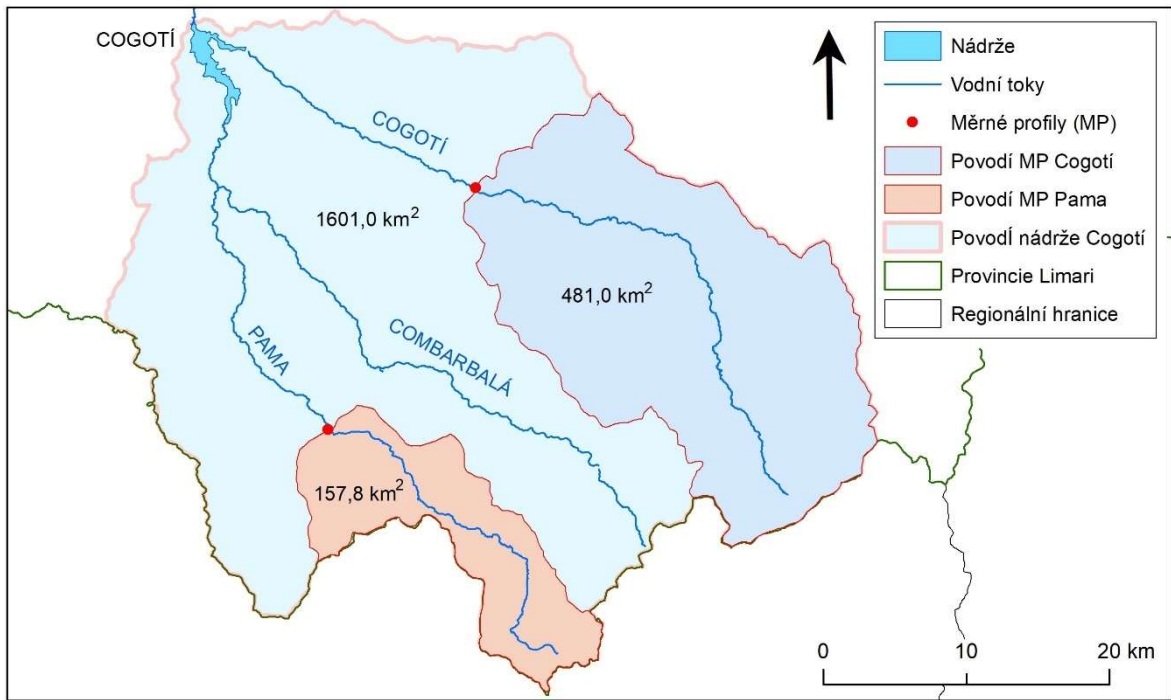
Tabulka 2.1 – Požadavky na závlahy (6)

Povodí	Požadavek na závlahy [ha]
Cogotí	4900
Combarbalá	3200
Pama	1700

2.1. HYDROLOGICKÁ DATA

Vodohospodářské řešení soustavy nádrží bylo provedeno na základě reálné řady hydrologických údajů v profilu přehrady Cogotí od roku 1945 do současnosti. Získaná data představují evidenci hodnot objemů, ztrát a odtoků z nádrže v diskrétních měsíčních časových intervalech.

Doplňujícími hydrologickými údaji byly reálné řady průměrných měsíčních hodnot průtoku od roku 1960 z profilů průtokoměrných stanic na řekách Cogotí a Pama (viz Obr. 2.1).



Obr. 2.1 – Doplnující měrné profily

2.2. PODKLADOVÉ MAPY

Vrstevnicové mapy jsou stěžejním podkladem k základní analýze vodních děl. Vzhledem k omezené dostupnosti digitálního modelu terénu oblasti či podkladových vrstevnicových WMS služeb v zájmovém území bylo využito online portálu Mapy.cz (8). Snímek vrstevnicové mapy byl georeferencován na podkladu World Street Map, online WMS služby programu ArcGIS. Doplnujícími podklady byly shapefilové soubory dostupné na chilském webovém portálu Biblioteca del Congreso Nacional, obsahující data o regionálních hranicích, vodních tocích a nádržích v Chile. (9)

2.3. STUDIE VODNÍHO DÍLA VALLE HERMOSO

Přehrada Valle Hermoso je prvním realizovaným vodním dílem z plánovaných staveb v povodí, jehož dokončení je plánováno v roce 2019. Informace o batygrafii a minimálním zůstatkovém průtoku uvedené v získané studii (10) byly použity ke zpřesnění charakteristických čar vodního díla a získání údajů o minimálním zůstatkovém průtoku.

3. ZVOLENÉ METODICKÉ POSTUPY

Tvorba simulačního modelu vyžaduje podrobnou analýzu hydrologických dat. Odvozené průtoky v jednotlivých profilech potenciálních vodních děl v povodí je základní bilanční

složkou vodohospodářského řešení. Dále je nutné posoudit ostatní stěžejní složky bilance, to znamená posoudit ztráty z nádrže průsaky i výpary a analyzovat odběry vody pro závlahy.

Na základě získaných dat bude vytvořen simulační model, který porovnáme se získanými údaji o chronologickém průběhu objemu v nádrži a výsledné zabezpečení dodávky vody, čímž ověříme věrohodnost vytvořeného modelu. Dále do modelu zahrneme potenciální vodní díla v povodí a vytvoříme simulační model soustavy nádrží. Vytvořeným simulačním modelem vodohospodářské soustavy budou vyhodnoceny variantní dopady na zabezpečení zásobní funkce nádrže Cogotí a potenciálních vodních děl v povodí a stanoven orientační hydroenergetický potenciál nádrže Cogotí.

3.1. ANALÝZA HYDROLOGICKÝCH DAT

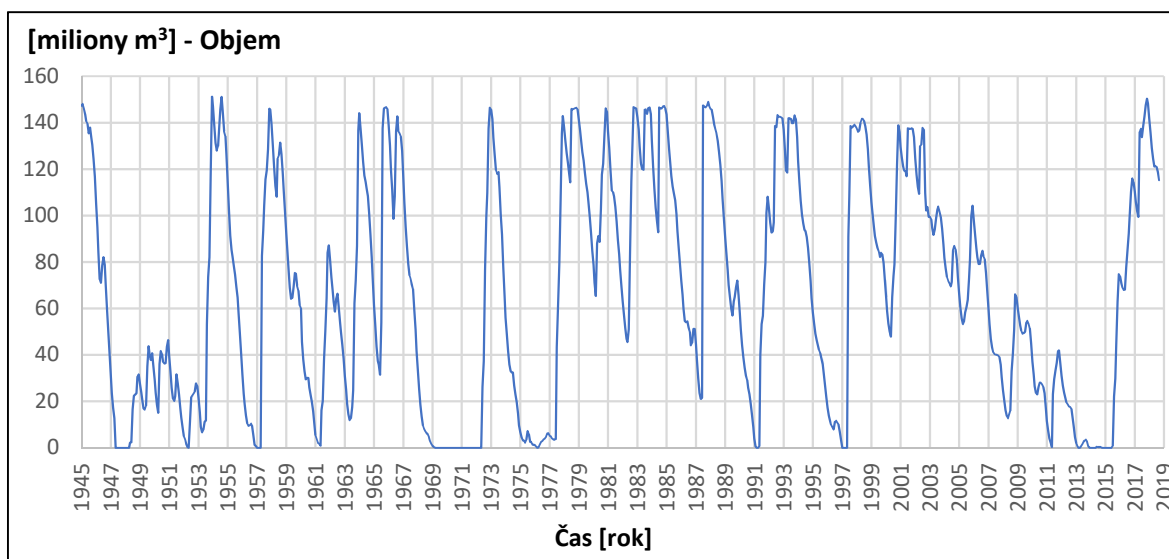
Údaje o průtocích v povodí a bilanci vody v nádrži jsou základním vstupem pro výpočet vodohospodářského řešení a jejich spolehlivost je stěžejní k obdržení reprezentativních výsledků. Správně zvolený postup vyhodnocení obdržených materiálů je tudíž nezbytností.

3.1.1. ODVOZENÍ REÁLNÉ PRŮTOKOVÉ ŘADY

Základním vstupním souborem dat pro výpočet je evidence bilance objemů vody v nádrži Cogotí (viz Graf 3.1). Z grafu je zřejmé, že se jedná o nádrž s víceletým řízením odtoku. Předností této reálné řady dat ve formě diskretních měsíčních hodnot (viz Tabulka 3.1) je rozsáhlé časové rozpětí od roku 1945 do současnosti. Délka hydrologické řady přispívá k celkové spolehlivosti vodohospodářského řešení. Na základě 73 let dlouhého souboru dat, obsahujícího jak období vodná, tak i velmi suchá, byla eliminována nutnost generace syntetické řady průměrných měsíčních průtokových hodnot.

Tabulka 3.1 – Vzorový rok se získanými daty

ROK	MĚSÍC	SRÁŽKY mm	HLADINA m	OBJEM VODY V NÁDRŽI tis. m ³	PRŮSAKY m ³	ODBĚRY		VÝPAR m ³	PŘEPAD PŘES PŘELIV m ³
						RÍO HUATULAME m ³	CANAL COGOTÍ m ³		
1946	LEDEN		55,11	105 069	1 631 606	1 767 744	9 438 917	1 180 480	0
1946	ÚNOR		53,24	94 900	1 426 220	1 576 672	7 828 572	866 250	0
1946	BŘEZEN		51,14	84 247	1 519 787	1 687 392	8 462 606	691 918	0
1946	DUBEN	13	48,62	72 584	1 402 201	1 632 960	9 773 400	376 740	0
1946	KVĚTEN	33	48,28	71 092	1 439 347	1 687 392	1 569 600	200 200	0
1946	ČERVEN	69	49,93	78 529	1 437 991	1 762 560	530 362	178 640	0
1946	ČERVENEC	8	50,68	82 044	1 506 926	1 821 312	157 962	181 720	0
1946	SRPEN	20	49,97	78 687	1 486 881	1 821 312	3 343 988	264 880	0
1946	ZÁŘÍ		48,05	70 124	1 386 824	1 788 128	8 160 888	324 310	0
1946	ŘÍJEN		45,50	59 699	1 361 287	1 874 880	8 743 320	533 960	0
1946	LISTOPAD		42,83	49 948	1 244 724	1 451 520	8 361 936	625 870	0
1946	PROSINEC		39,99	40 400	1 206 283	1 232 064	7 305 012	641 360	0



Graf 3.1 - Chronologický průběh zásoby vody v nádrži Cogotí

Nedostatkem získaných dat je absence přímého měření přítoku do nádrže. Informace o hodnotách průměrného měsíčního přítoku byla odvozena na základě bilance vody v nádrži, která vyplývá ze součtu rozdílu objemu vody v nádrži ΔV , sumy odtoku $\sum O$, skládající se z odběru O_P a přepadu přes bezpečnostní přeliv O_{BP} a sumy ztrát $\sum Z$, skládajících se ze ztrát průsakem Z_P a ztrát výparem E .

$$Q_m = \frac{\Delta V + O_P + O_{BP} + Z_P + E}{86\,400 \cdot m} \quad (3.1),$$

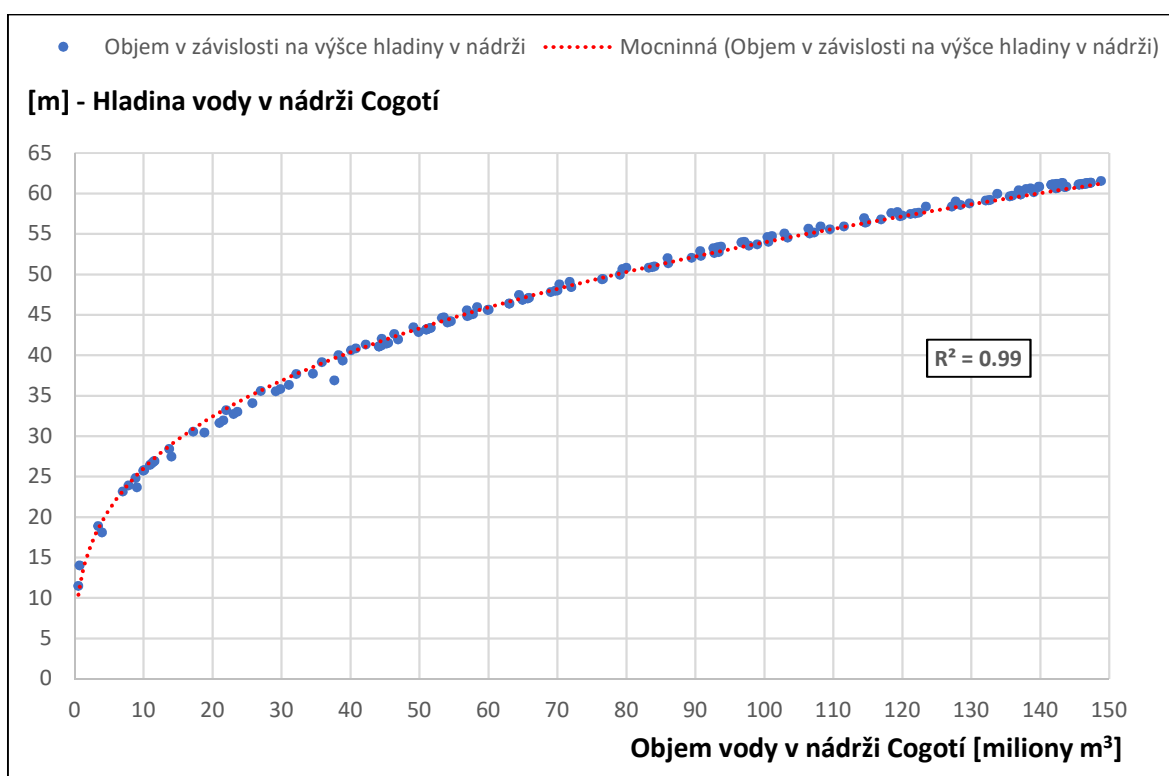
$$\text{tedy } Q_m = \frac{\Delta V + \sum O + \sum Z}{86\,400 \cdot m} \quad (3.2),$$

kde Q_m představuje hodnotu průměrného měsíčního přítoku v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a m je počet dní v měsíci.

Odvození hydrologických dat vnáší do výpočtu řadu nepřesností a je proto vhodné výslednou reálnou řadu porovnat s dalšími měrnými profily v povodí a ověřit tak korektnost výsledné řady. Kalibrace byla provedena na základě dat z průtokoměrných stanic na vodních tocích Cogotí a Pama, (viz kapitola 3.2.1 Ověření hydrologické analogie v měrných profilech na vodních tocích Cogotí a Pama).

3.1.2. ODVOZENÍ CHARAKTERISTICKÝCH ČAR PŘEHRADY COGOTÍ

Drobným nedostatkem obdržných dat je 42 % chybějících dat o průměrných hladinách v nádrži pro rozsáhlé časové úseky. Na základě měsíců s evidovanou průměrnou výškou hladiny byla vytvořena čára zatopených objemů (viz Graf 3.2). Po proložení mocninnou spojnicí trendu byl získán matematický předpis pro vztah mezi hladinou h a objemem V , který umožnil doplnit chybějící průměrné měsíční výšky hladin v nádrži.



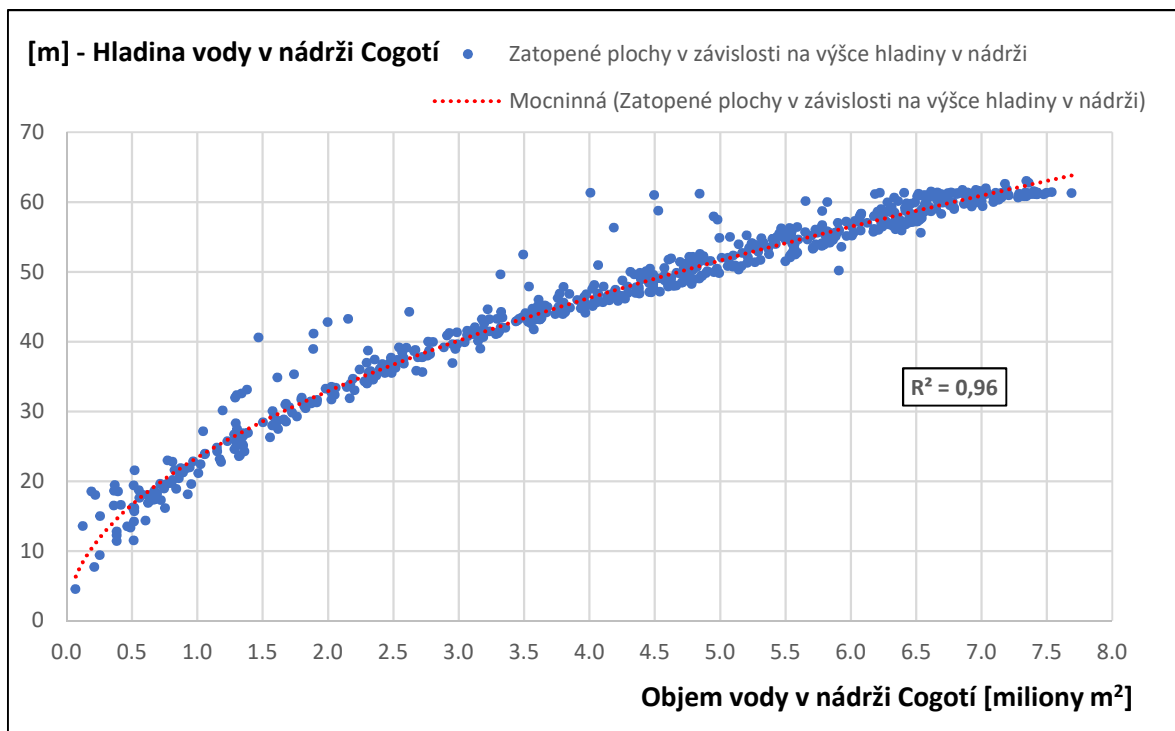
Graf 3.2 – Odvození čáry zatopených objemů

Na základě evidence jak výparné výšky E v mm, tak i ztráty objemu výparem V_E v m³ za měsíc, bylo možné zpětně vytvořit čáru zatopených ploch (viz Graf 3.3) neboť

$$V_E = S \cdot \frac{E}{1000} \quad (3.3),$$

$$\text{tedy } S = \frac{V_E}{E} \cdot 1000 \quad (3.4),$$

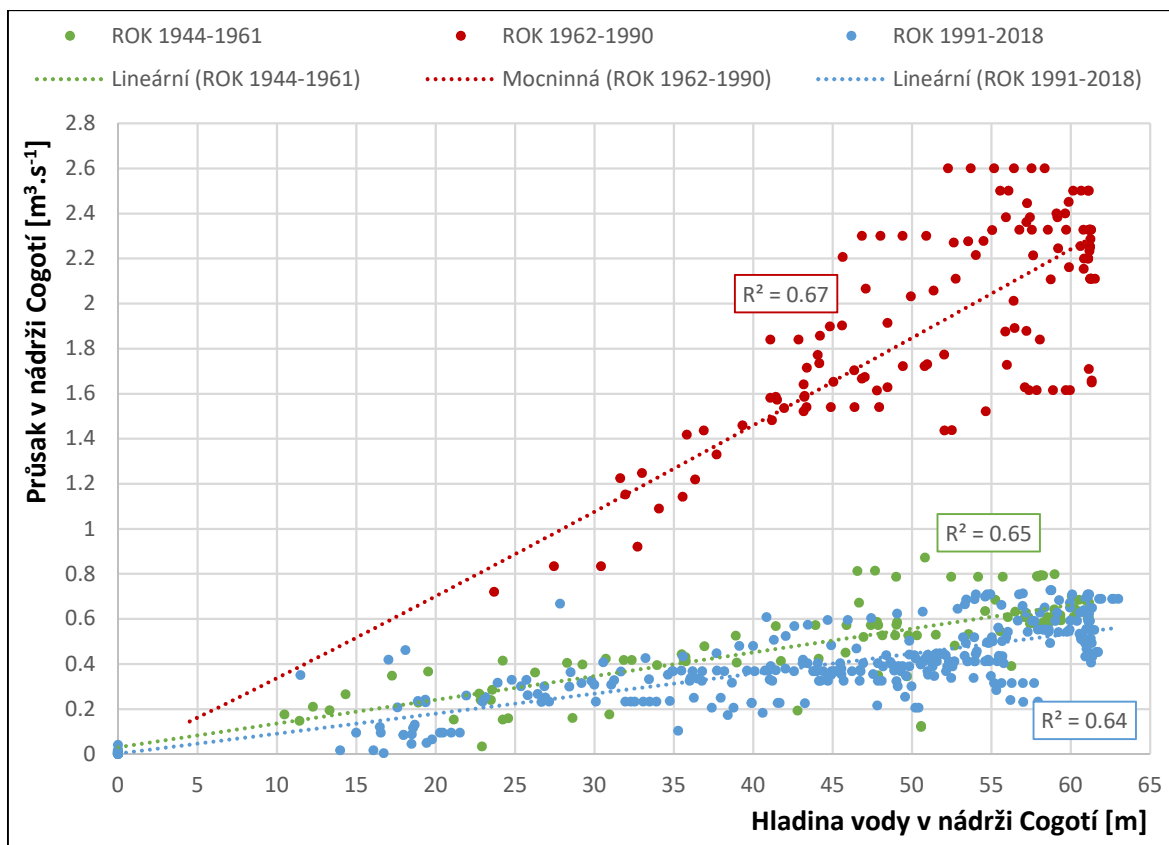
kde S je zatopená plocha v m^2 .



Graf 3.3 – Odvození čáry zatopených ploch

3.1.3. ODVOZENÍ PRŮSAKU

Významným nedostatkem získaných dat jsou chybějící údaje o průsacích zejména v letech 1964 – 1977. Hodnoty průsaků jsou jednou ze složek bilance vody v nádrži nezbytných k odvození reálné řady průtoků. Pro doplnění chybějících údajů byl nalezen vztah mezi průsaky a tlačnou výškou vody v nádrži (viz Graf 3.4). Je zřejmé, že v průběhu evidovaného souboru dat se funkční závislost průsaků měnila. Zvýšené průsaky mezi lety 1962 – 1990 jsou přisuzovány poruše měděného těsnění mezi dilatačními spárami, které bylo v tomto období sanováno. K aproximaci průběhu průsaků byly rozdílné závislosti analyzovány v čase a proloženy spojnicemi trendu. Podle získaných funkčních závislostí byly chybějící údaje o průsacích doplněny.



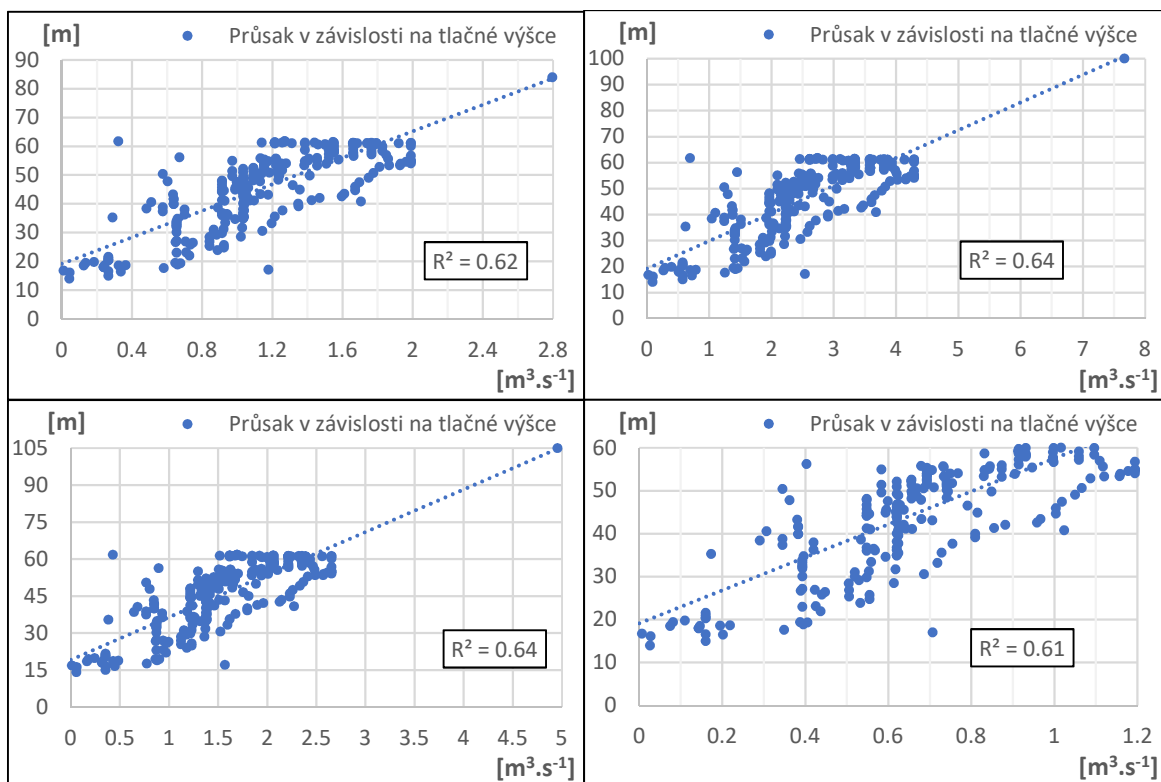
Graf 3.4 – Odvození průsaku

Průběh průsaků na plánovaných vodních dílech v povodí byl zprvu vzhledem k podobnosti plánované konstrukce extrapolován z průběhu průsaků na vodním díle Cogotí v letech 1991-2018. Hodnoty ztrát průsakem Z_P [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], byly vztaženy k délce základové spáry L_{SP} [m] na daném vodním díle.

$$Z_{P,2} = \frac{L_{SP,2}}{L_{SP,1}} \cdot Z_{P,1} \quad (3.5),$$

kde $Z_{P,1}$, $L_{SP,1}$ představují referenční přehradu Cogotí a $Z_{P,2}$, $L_{SP,2}$ posuzované vodní dílo v povodí.

Extrapolované hodnoty průsaku byly proloženy vhodnými spojnicemi trendu (viz Graf 3.5). Na základě získané funkční závislosti byly odvozeny hodnoty průsaků pro plánovaná vodní díla v povodí.

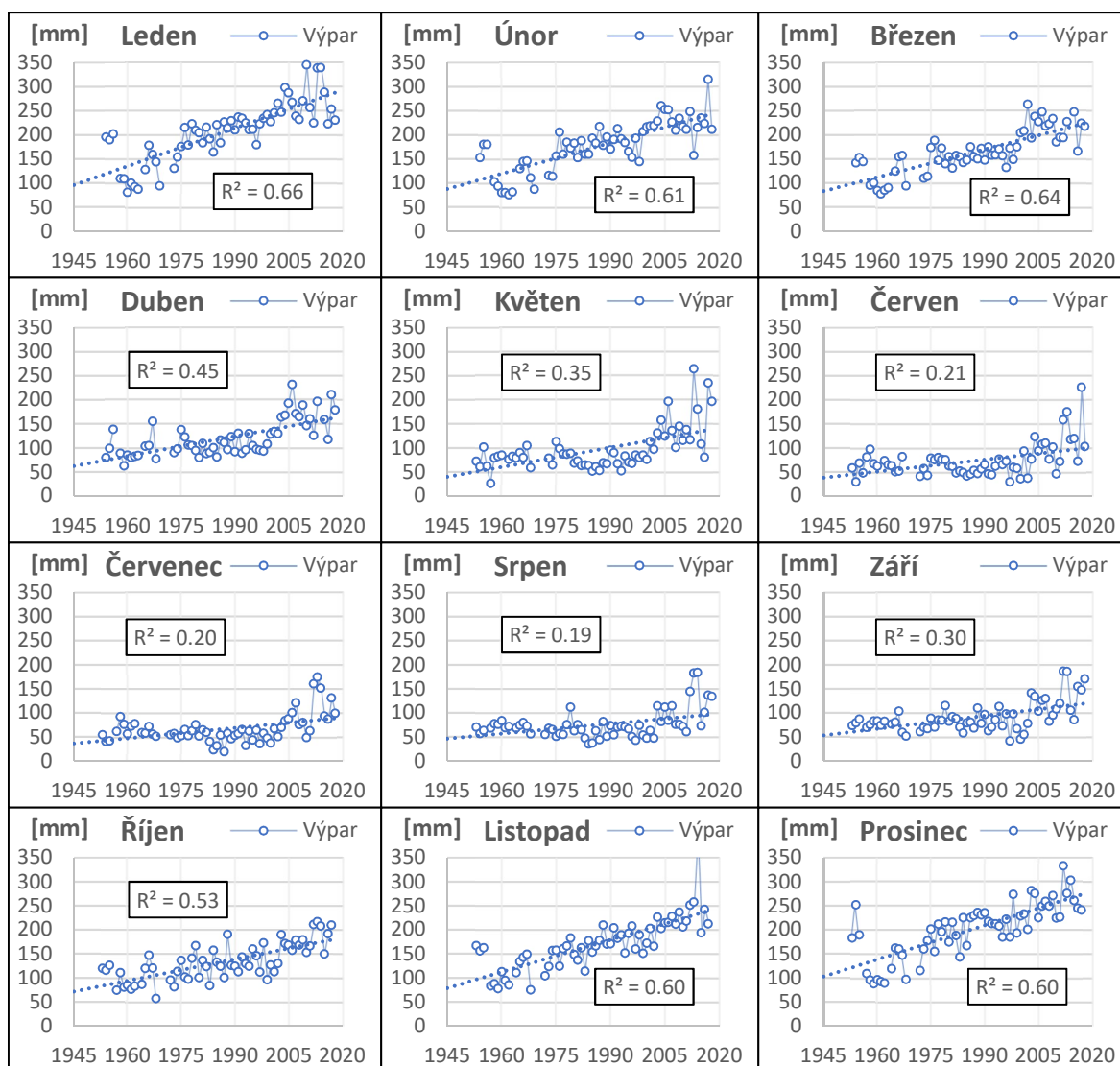


Graf 3.5 – Vyhodnocené průsaky vodních děl Valle Hermoso (vlevo nahoře), Murallas Viejas (vpravo nahoře), Curcita (vlevo dole) a Tranca (vpravo dole)

Použitím metody extrapolace dat z přehrady Cogotí bylo dosaženo nadměrně vysokých průsaků vzhledem k celkovému objemu plánovaných nádrží. Z toho důvodu byl přijat předpoklad minimalizace ztát. Podle Mezinárodní přehradní komise (ICOLD) mohou rockfillové konstrukce hradících těles, i přes mnohé dokumentované problémové případy, dosáhnout velice nízkých hodnot průsaku. Kupříkladu přehrada Antamina v Peru o výšce 140 m, uvedená v odborné literatuře (7), dosáhla po dokončení průsakových hodnot nižších než 1 l.s^{-1} . Jelikož v rámci výpočtu je uvažováno s průsaky jako součástí průtoku v korytě pod hrází, jeho příslušné hodnoty budou zahrnuty v povinném minimálním zůstatkovém průtoku, který se na uvažovaných potenciálních vodních dílech pohybuje mezi 11 až 156 l.s^{-1} .

3.1.4. ODVOZENÍ VÝPARU

Analýza výparu E [mm] byla provedena separací dat pro jednotlivé měsíce a vynesím do grafu v závislosti na čase (viz Graf 3.6). Proložením spojnicí trendu byly odvozeny funkční závislosti výparu pro každý měsíc.



Graf 3.6 – Rostoucí trend výparu na přehradě Cogotí v jednotlivých měsících, kde na svislé ose je uvedena výparná výška a na vodorovné je uveden čas

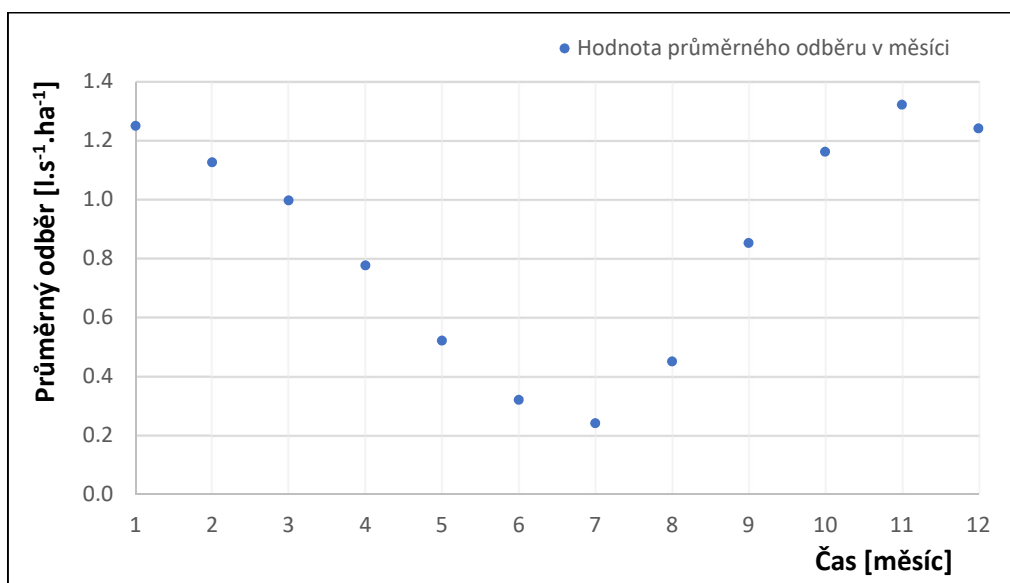
Z výsledných grafů je zřejmý nárůst výparu, patrně rostoucími teplotami vlivem změny klimatu. Odvozené ztráty výparem byly aplikovány na plánovaná vodní díla v povodí (viz Rovnice 3.3).

3.1.5. ODBĚR VODY PRO ZÁVLAHOVÉ ÚČELY

Odběr vody je dán potřebou vody, tj. součtem nároků na odběr z nádrže s jejich časovým rozdělením. Plánovaná vodní díla v povodí plní především funkci zajištění zabezpečení odběru vody pro závlahy. Odvození potřeby vody v povodích jednotlivých vodních děl bylo provedeno na základě analýzy odběrů v profilu nádrže Cogotí. Vstupními podklady pro reprezentativní posouzení byly údaje o rozsahu zavlažovaných ploch v dílčích povodích (viz Tabulka 2.1) a reálná řada evidovaných odběrů pro závlahové účely z nádrže

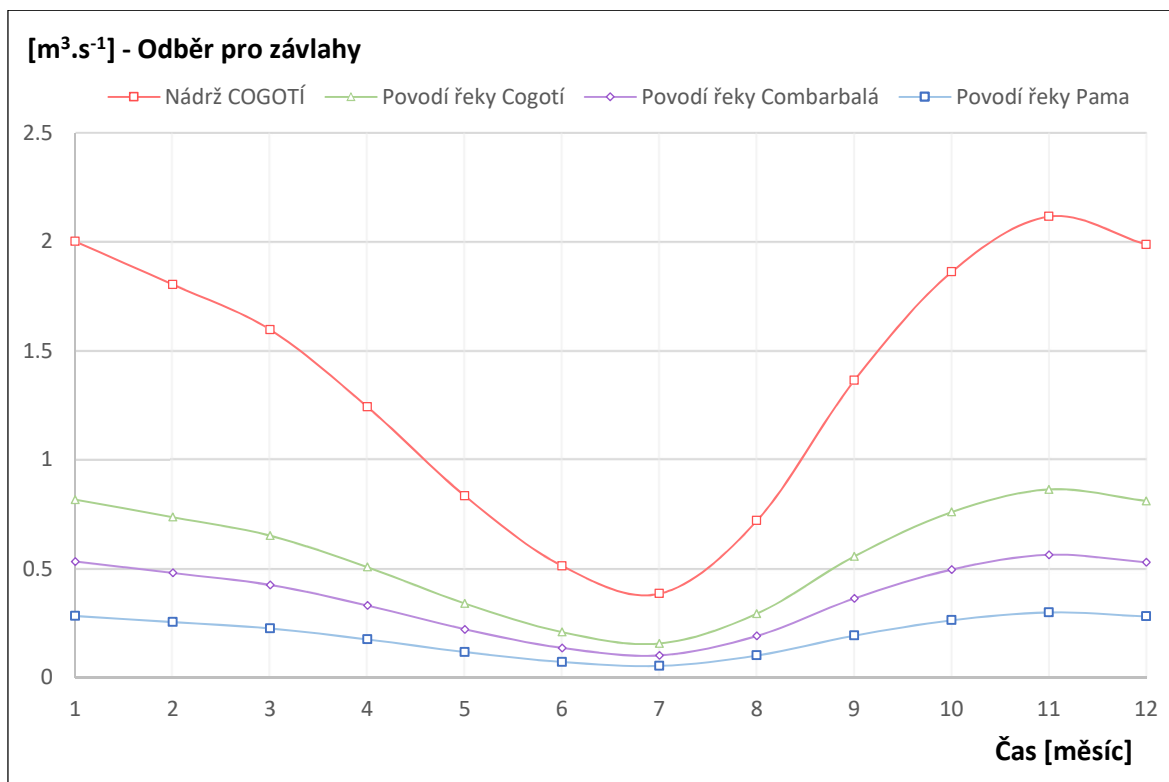
Cogotí. Získaná reálná řada je zdánlivě nekonformní. Řízení odběru je dáno aktuálními požadavky od sdružení zemědělců a jeho průměrné hodnoty se v čase mění.

Rozdělením odběrů do jednotlivých měsíců a určením jejich průměrné hodnoty byl zohledněn zemědělský sezónní cyklus. Extrapolace na plánovaná vodní díla byla provedena určením potřeby vody na 1 ha, podělením průměrné měsíční potřeby vody O_z , celkovou zavlažovanou plochou 12 000 ha přehradou Cogotí (viz Graf 3.7).



Graf 3.7 – Potřeba vody v měsíci na 1 hektar v semiaridní oblasti provincie Limarí

Na základě znalosti rozlohy zavlažovaných ploch v daném povodí (viz Tabulka 2.1) byly poté dopočteny skutečné průměrné potřeby vody pro každý měsíc v roce vynásobením průměrného odběru vody pro závlahy na 1 ha, rozlohou plánované zavlažované plochy (viz Graf 3.8).



Graf 3.8 – Odběry vody pro závlahy v dílčích povodích nádrže Cogotí

Odběr vody pro závlahy byl analyzován k umožnění aplikace definovaného průběhu odběru vody při posuzování dopadu potenciálních vodních děl na zásobní funkci nádrže Cogotí.

Požadavky na zavlažované plochy v povodí (viz Tabulka 2.1), které byly zahrnuty do výpočtu, jsou uvažovány jako odběry nad rámec současných odběrů v povodí, z důvodu nedostatečných podkladových dat o odběrech ve sledovaném časovém úseku.

3.1.6. MINIMÁLNÍ ZŮSTATKOVÝ PRŮTOK

Z vyhlášky č. 14 chilského práva z roku 2012 vychází:

„Pro každý měsíc v roce bude určen minimální zůstatkový průtok (MZP) v požadovaném bodu odběru s přihlédnutím na následující kritéria:

- a) Pro takové vodní toky, kde byla stanovena práva s minimálním ekologickým průtokem, na základě kritéria výpočtu 10 % průměrného ročního průtoku, bude bráno v úvahu 50 % z průtoku s pravděpodobností překročení (PP) 95 % pro každý měsíc s následujícími omezeními:
 - I) Pro takové měsíce, u nichž 50 % z průtoku s PP 95 % je menší než 10 % z Q_a , bude MZP rovno 10 % z Q_a .

- II) pro takové měsíce, u nichž bude 50 % z průtoku s PP 95 % větší než 10 % z Q_a , bude MZP právě 50 % z průtoku s PP 95 %.
 - III) pro takové měsíce, u nichž bude 50 % z průtoku s PP 95 % větší než 20 % z Q_a , bude MZP 20 % z Q_a .
- b) Pro takové vodní toky, kde byla stanovena práva s minimálním ekologickým průtokem menším než 50 % z průtoku s PP 95 %, bude MZP uvažován jako 50 % z průtoku s PP 95 % pro každý měsíc s následujícím omezením.
- I) pro takové měsíce, u nichž 50 % z PP 95 % je menší než 20 % z Q_a , bude MZP 50 % z PP 95 %.
 - II) pro takové měsíce, u nichž 50 % z PP 95 % je větší než 20 % z Q_a , bude MZP 20 % z Q_a .
- c) U takových toků, kde neexistují práva s minimálním ekologickým průtokem, se použije pro nová práva kritérium ustanovené v písmeně b) se stejnými omezeními.“ (11)

Minimální zůstatkový průtok, který musí být respektován, má měsíční variaci. Pro profil Valle Hermoso je uveden v následující tabulce (viz Tabulka 3.2) získané ze studie vodního díla Valle Hermoso. (10)

Tabulka 3.2 – Minimální zůstatkový průtok v profilu vodního díla Valle Hermoso (10)

Měsíc	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
MZP [m ³ .s ⁻¹]	0,046	0,025	0,014	0,011	0,014	0,023	0,034	0,042	0,044	0,097	0,135	0,093

Za účelem podrobného posouzení minimálního zůstatkového průtoku je třeba vyhodnotit řadu průměrných denních hodnot průtoku a sestavit empirickou čáru překročení. Z důvodu nedostatku potřebných dat bylo v případě ostatních potenciálních vodních děl v povodí přistoupeno k odvození minimálního zůstatkového průtoku na základě průměrného dlouhodobého průtoku Q_a , kde MZP je roven 10 % Q_a .

Tabulka 3.3 – Minimální zůstatkový průtok na základě průměrného dlouhodobého průtoku

Potenciální vodní díla v povodí	Qa	MZP
	[m ³ .s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]
Murallas Viejas	0,435	0,043
Tranca	1,812	0,181
Curcita	0,848	0,085

Minimální zůstatkový průtok na vodním díle Cogotí není stanoven. V současné době je zajišťován pouze průsaky podloží a tělesem hráze v kombinaci s průtokem určeným pro přehradu Paloma.

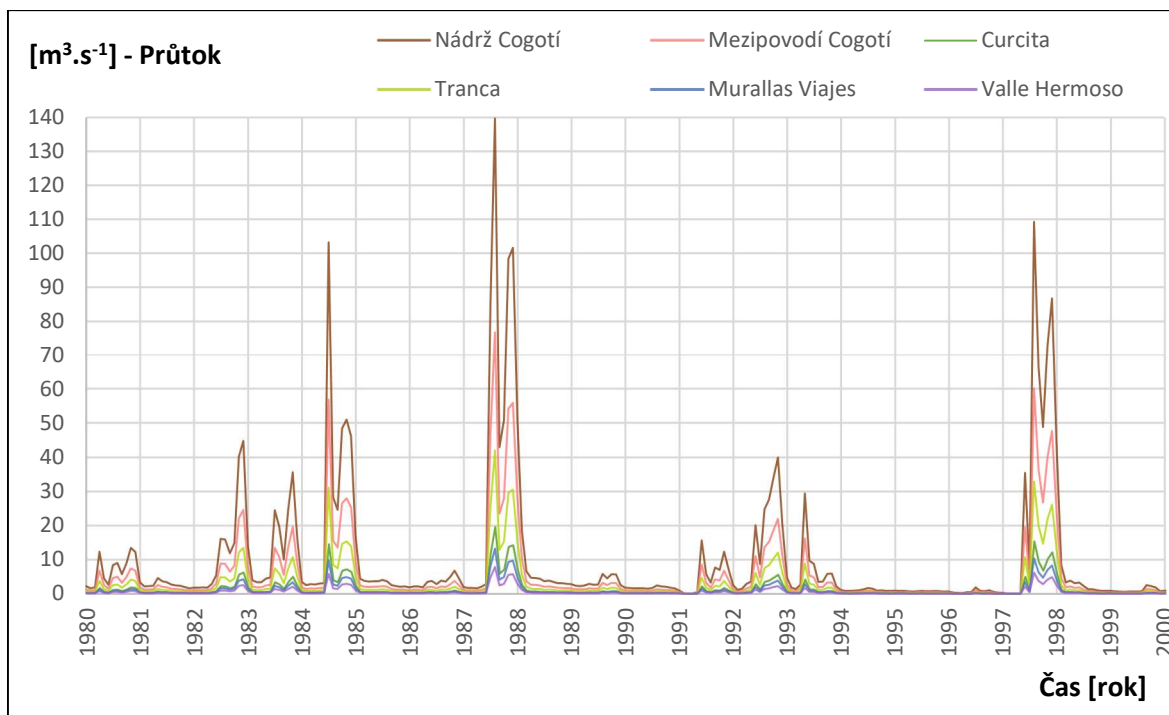
3.2. HYDROLOGICKÁ ANALOGIE

Získané hydrologické údaje jsou vztažené k přehradě Cogotí, nicméně pro posouzení vodních děl v povodí je třeba získat průtokové řady ke všem posuzovaným profilům. V případě, že ověřené hydrologické řady jsou k dispozici v blízkých profilech na týchž nebo na analogických tocích, lze reprezentativní a ověřené hydrologické řady v blízkých profilech přepočíst pomocí hydrologické analogie do profilů nádrží. (12) V dílčích profilech byla hodnota průtoku získána jako součin průtoku v povodí analogovém $Q_{m,A}$ s poměrem plochy povodí posuzovaného S_X ku poměru průtoků plochy povodí analogového S_A .

$$Q_{m,X} = K \cdot \frac{S_X}{S_A} \cdot Q_{m,A} \quad (3.6),$$

kde $Q_{m,X}$ představuje průměrný měsíční průtok v posuzovaném povodí v m³.s⁻¹ a K je kalibrační koeficient (viz Tabulka 3.4).

Výstupem jsou odvozené průtokové řady pro čtyři plánovaná vodní díla v povodí a průtoková řada z mezipovodí, které není potenciálními budoucími stavbami ovlivněno (viz Graf 3.9).



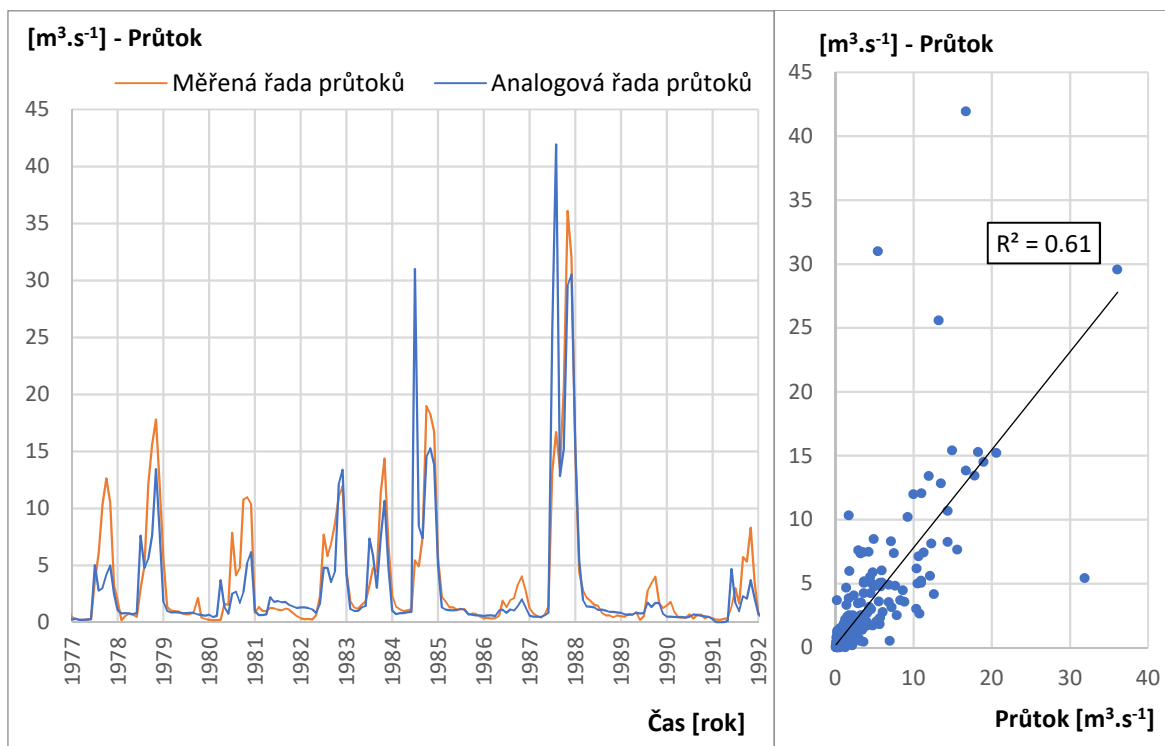
Graf 3.9 – Hydrologická analógie pro zvolené období 1980-2000

3.2.1. OVĚŘENÍ HYDROLOGICKÉ ANALOGIE V MĚRNÝCH PROFILECH NA VODNÍCH TOCÍCH COGOTÍ A PAMA

Podkladem byly chronologické řady průtoků z měrných stanic na vodních tocích Cogotí a Pama (viz kapitola 2.1 Hydrologická data) z let 1960 – 1992, které byly získány až po vypracování vodohospodářského řešení, a proto byly použity pouze jako kontrolní data. V měrných profilech byly hydrologickou analogií vytvořeny vlastní odvozené řady průtoků. Pro korespondující profily v odpovídajících časových intervalech byl vypočten dlouhodobý průměrný přítok Q_a (viz Tabulka 3.4) výpočtem střední hodnoty dané řady, tedy

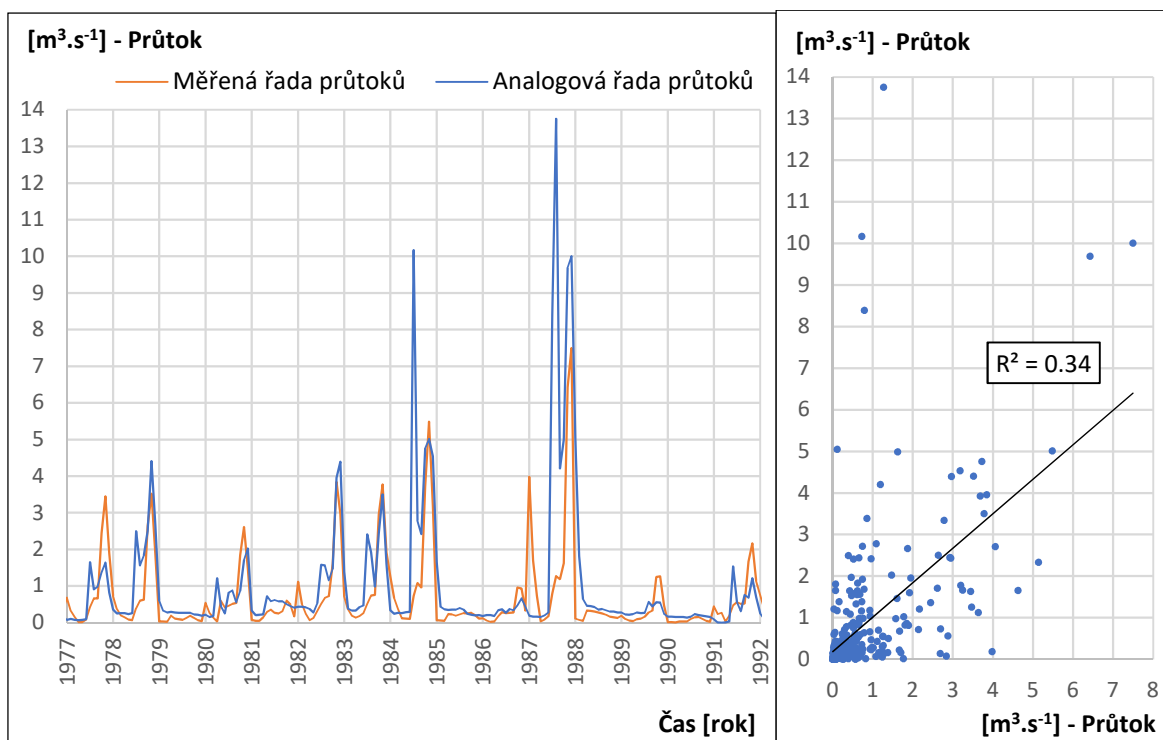
$$Q_a = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.7),$$

kde n představuje počet prvků v souboru a x_i hodnotu prvku v kroku i . Následně byly odpovídající řady porovnány v grafu a byla posouzena jejich korelační závislost (viz Graf 3.10).



Graf 3.10 – Porovnání odpovídajících řad v profilu řeky Cogotí, ověření korelační závislosti průtoků

Je zřejmé, že kulminační průtoky z řady průtoků v měrném profilu řeky Cogotí korespondují s kulminačními průtoky v řadě analogicky odvozené. Posouzení korelace potvrzuje existující závislost průtokových řad.



Graf 3.11 – Porovnání odpovídajících řad v profilu řeky Pama, ověření korelační závislosti průtoků

Průtokové řady v měrném profilu řeky Pama vykazují jistou míru závislosti.

Z důvodu obdržení řad z měrných profilů až po vyhodnocení výsledků práce, jejich charakter je pouze ověřovací a bylo přistoupeno k posouzení na základě průměrného dlouhodobého průtoků (viz Tabulka 3.4).

Tabulka 3.4 – Ověření průměrného dlouhodobého průtoků

Měrný profil	Q_a [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]		Kalibrační koeficient
	Měřená řada průtoků	Analogová řada průtoků	
MP Cogotí	2,55	2,12	1,20
MP Pama	0,62	0,70	0,89

Na základě předpokladu shody dlouhodobých průměrných průtoků v řadě měřené a v řadě analogové byl navržen kalibrační koeficient pro povodí odpovídajících vodních toků a použit pro úpravu analogových řad podle rovnice (3.6). Vzniklý rozdíl průtoků v uzávěrovém profilu byl rozdělen podle hydrologické analogie do zbylých povodí.

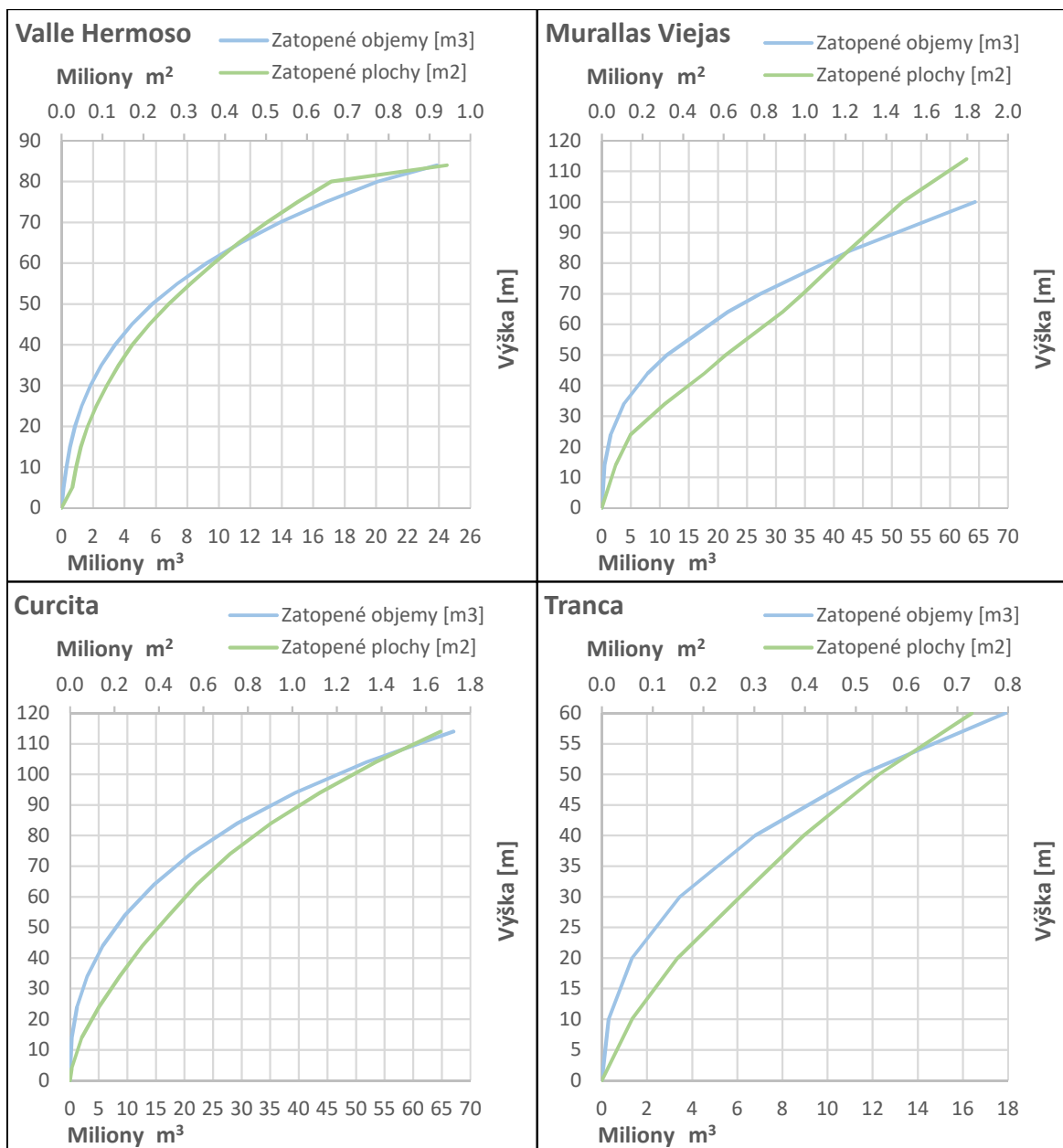
3.3. BATYGRAFICKÉ ČÁRY PLÁNOVANÝCH VODNÍCH DĚL V POVODÍ

Čáry zatopených ploch (viz Graf 3.12) pro jednotlivé profily byly získány z vrstevnicového podkladu měřením ploch S [m²] omezených zvolenou vrstevnicí v terénu o známé výšce h [m] a návodní plochou vodního díla.

Zatopené objemy byly dopočítány jako součet objemu V v kroku $n-1$ s dílčím objemem $V_{(\Delta h)}$, který je spočítán jako součin výškového rozdílu Δh s průměrem mezi plochou S_n a S_{n-1} , tedy

$$V_n = \frac{S_n + S_{n-1}}{2} \cdot \Delta h + V_{n-1} \quad (3.8),$$

kde V_n představuje celkový objem nádrže v m³ ve výšce $h_n + \Delta h$. Výsledné hodnoty byly vyneseny do grafu (viz Graf 3.12).



Graf 3.12 – Vyhodnocené batygrafické čáry vodních děl Valle Hermoso (vlevo nahoře), Murallas Viejas (vpravo nahoře), Curcita (vlevo dole) a Tranca (vpravo dole)

3.4. VÝPOČET SPOLEHLIVOSTI DODÁVKY VODY

Zabezpečení dodávky vody z vodního díla je pravděpodobnost, že zaručovaný parametr dodávky vody neklesne pod danou hodnotu. Míra spolehlivosti plné dodávky vody se udává normativem návrhové zabezpečení, který se určuje z opakování nepříznivých hydrologických podmínek v dlouholeté perspektivě.

„Kvantitativně se zabezpečení vyjadřuje třemi způsoby:

- a) Jako podíl počtu let, ve kterých bude dodávka zajištěna bez omezení, tj.

$$P_o = \frac{N-n_p}{N} \cdot 100 \% \quad (3.9),$$

je-li N celkový počet roků provozu nádrže a n_p počet poruchových roků z nich. Takto vyjádřený ukazatel se nazývá zabezpečení podle opakování.

- b) Jako podíl délky trvání bezporuchového provozu z celkové doby provozu nádrže, tj.

$$P_t = \frac{T-t_p}{T} \cdot 100 \% \quad (3.10),$$

je-li T celková doba provozu nádrže (zpravidla vyjádřena v počtech měsíců) a t_p celkové trvání poruch (opět v počtech měsíců). P_t se nazývá zabezpečení podle trvání.

- c) Jako podíl skutečně dodané vody z požadovaného objemu dodané vody za dobu provozu nádrže, tj.

$$P_d = \frac{W-w_p}{W} \cdot 100 \% \quad (3.11),$$

kde W je celkový požadovaný objem dodávky vody a w_p je objem, který nebyl za poruch dodán. P_d se nazývá zabezpečení podle objemu dodávky vody.“ (12)

„Výstižnějším ukazatelem dodávky vody či energie se jeví vyjádření poruch v procentech podle jejich trvání, protože se s vyšší pravděpodobností shoduje s procentem hospodářských ztrát.“ (13)

Zabezpečení nádrže je volena především s ohledem na ekonomickou otázku. (13) Pro účely posouzení variantních řešení dopadu vodních děl v povodí na zásobní funkci nádrže Cogotí, bude zvolený parametr určovat hranici optimálního řešení. Jelikož nebyla získána chilská metodika posouzení zabezpečení, bylo přistoupeno k vyhodnocení na základě české normy. Podle ČSN 75 2405 (14), dělíme normativy návrhové zabezpečení do 4 tříd z hlediska významnosti odběratele (A, B, C, D) (viz Tabulka 3.5). Pro závlahové nádrže spadající do třídy D udává normativ zabezpečení podle trvání 95 %. Vzhledem k vysokým potřebám dodávek vody v semiaridním prostředí musely být nároky na zabezpečení podle trvání sníženy na 90 %, čili míru zabezpečení vyhovující podle odborné literatury. (13)

Tabulka 3.5 – Doporučené zabezpečení podle trvání (14)

Třída významnosti	A	B	C	D
Zabezpečení podle trvání plné dodávky [%]	$\geq 99,5$	$\geq 98,5$	$\geq 97,5$	≥ 95

3.5. VODOHOSPODÁŘSKÉ ŘEŠENÍ ZÁSObNÍ FUNKCE PŘEHRADY COGOTÍ

Vyhodnocení zásobní funkce neovlivněné přehrady bylo řešeno na základě obdržených dat, sestavením grafu chronologického průběhu zásobního objemu a výpočtu míry zabezpečení zásobního objemu, jejíž teoretický výpočet je popsán v kapitole 3.4 Výpočet spolehlivosti dodávky vody. Vodohospodářské řešení zásobní funkce přehrady Cogotí především závisí na posouzení dopadu potenciálních vodních děl v povodí, jejichž řešení je popsáno v následující kapitole 3.5.1 Vliv nádrží v povodí na zásobní funkci vodního díla Cogotí.

3.5.1. VLIV NÁDRŽÍ V POVODÍ NA ZÁSObNÍ FUNKCI VODNÍHO DÍLA COGOTÍ

Princip všech vodohospodářských řešení nádrží v chronologických řadách záleží v postupném chronologickém sestavování bilance mezi přítokem a odtokem (popř. odběrem a ztrátami) z ní, nezávislým nebo závislým na stavu vody v nádrži. (13) Na základě hydrologických dat a vyhodnocených požadavků na vodu od uživatelů jednotlivých vodních děl byl postupně bilanční metodou vodohospodářského řešení zásobní funkce sestaven simulační model v tabelárním uspořádání.

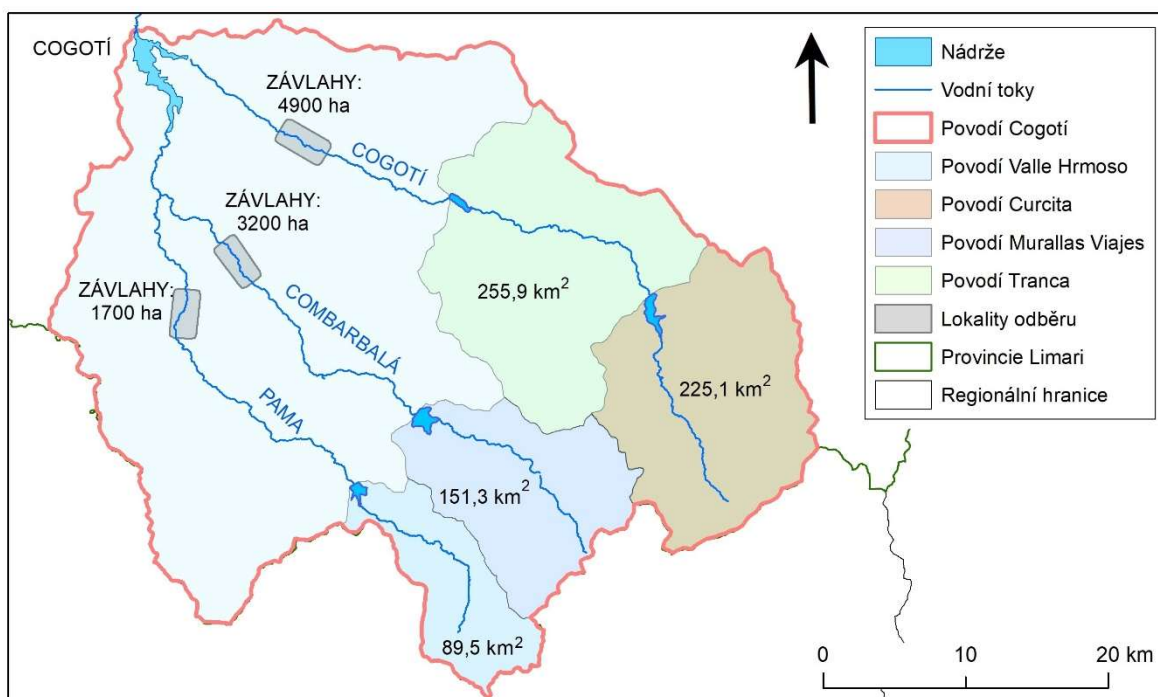
Simulační model lze definovat jako metodu, využívající matematické a logické postupy či algoritmy k napodobení dynamického chování vodohospodářské soustavy zpravidla v diskrétních časových okamžicích. Simulační modely umožňují pomocí matematických a logických operátorů formalizovat chování libovolného reálného systému a vyhodnocovat důsledky manipulačních rozhodnutí při jeho řízení bez jejich uskutečnění v reálném systému. Vstupem bývají často reálné, popř. syntetické průtokové řady, které představují stochastický hydrologický podklad. (12)

3.5.1.1. Definování systému na vodohospodářské soustavě

Soustava se skládá z posuzované přehrady Cogotí, která uzavírá celé zájmové povodí, nádrže Valle Hermoso na vodním toku Pama, jejíž dokončení je plánována na rok 2019

a třech potenciálních vodních děl v povodí. Murallas Viejas na vodním toku Combarbalá a vodní dílo Tranca tvoří kaskádu s přehradou Curcita na vodním toku Cogotí. Z typologického hlediska se jedná o soustavu nádrží na více vodních tocích.

Odtok ze zásobního prostoru v profilech potenciálních vodních děl je ovlivněn zvoleným způsobem manipulace na konkrétním vodním díle a uvažovanou potřebou vody v daném území. Pozměněný režim odtoku je dán ovlivněným přítokem vody do zásobního prostoru níže ležících nádrží v souladu se schématem vodohospodářské soustavy, (viz Obr. 3.1).



Obr. 3.1 – Schéma systému posuzované vodohospodářské soustavy v povodí nádrže Cogotí
Zásobní nádrže by měly zajistit zabezpečený odběr zemědělcům v povodí vodního toku, ve kterém se vodní díla nacházejí. Jelikož v povodí řeky Cogotí platí podmínka výstavby pouze jedné z potenciálních přehrad (Curcita, nebo Tranca) s retenční funkcí pro závlahové účely, není posuzováno zásobení povodí řeky Cogotí ze dvou zásobních nádrží naráz.

3.5.1.2. Podmínky manipulačního řízení

V rámci výpočtu vodohospodářské soustavy byly navrženy čtyři způsoby, jak ovlivnit chování systému změnou manipulačních pravidel pro jednotlivá vodní díla, na jejichž základě je možné variantně posoudit navržené zatěžovací scénáře.

- 1) **Požadované odběry pro závlahy Oz** uvažujeme jako vodu odebranou ze systému v daném povodí. Nejedná se o přímý odběr z nádrže, jelikož dochází k odběru

až pod vodním dílem, odtok ze zásobního prostoru průsaky, případem přes bezpečnostní přeliv či definovaným odtokem z nádrže, je v daném časovém kroku využitelný k odběru. Pokud je zásobní prostor prázdný a odběr převyšuje přítok do nádrže, pak odtok z nádrže je roven nule.

- 2) **Zvolený přidaný odtok z nádrže O_v** je definovaný jako jalový průtok vypouštěný ze zásobního prostoru nádrže do vodního toku nad rámec požadovaných odběrů. Je stanoven na základě zvolených manipulačních scénářů, které jsou popsány v kapitole 4.3 Variantní vyhodnocení dopadů na zásobní funkci nádrže Cogotí.
- 3) **Podmínka limitního průtoku v profilu nádrže** je uplatněna při překročení limitního průměrného měsíčního přítoku do nádrže, kdy nadlimitní objem přítoku bude vypuštěn do systému soustavy, aby nadleplil přítoky do zásobního prostoru níže ležící nádrže.
- 4) **Limitní úroveň hladiny v nádrži přehrady Cogotí** je podmínka regulující přítok do potenciálních vodních děl v povodí. Při aplikaci manipulační podmínky platí, že zásobní prostor nádrží je plněn pouze při překročení limitní hladiny v nádrži přehrady Cogotí.

3.5.1.3. Výpočet soustavy nádrží

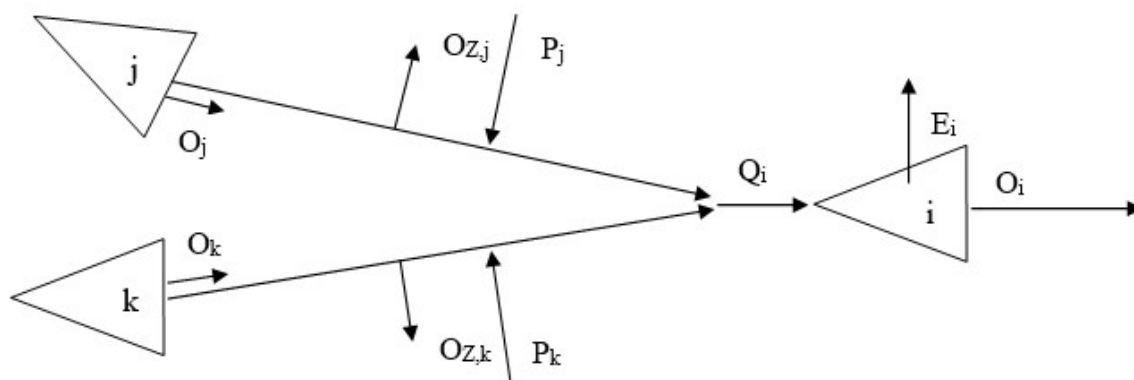
Podle následující bilanční rovnice 3.12 byla vypracována bloková schémata výpočtu pro všechny vodohospodářské uzly a nádrže s uvažováním jejich vodohospodářských vztahů.

(12) Výpočet objemu V nádrže i v čase t se provádí kompenzačním bilancováním v každém vodohospodářském uzlu bilanční rovnicí (3.12), jejíž schéma je znázorněno na Obr. 3.2.

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + Q_{i,t} - O_{i,t} - E_{i,t} \quad (3.12),$$

kde $V_{i,t-1}$ je objem v nádrži i v předešlém časovém kroku v jednotkách m^3 .

$Q_{i,t}$ je ovlivněný přítok do nádrže i v čase t v jednotkách m^3 za určený časový krok.



Obr. 3.2 – Blokové schéma bilanční rovnice soustavy nádrží

$$Q_{i-t} = \sum P_{n,t} + \sum O_{n,t} - \sum O_{Z,n,t} \quad (3.13),$$

kde $P_{n,t}$ je přítok z mezipovodí n v čase t v jednotkách m^3 za určený časový krok.

$O_{Z,n,t}$ jsou požadované odběry pro závlahy v povodí n v čase t v jednotkách m^3 za určený časový krok. Stanovení jeho hodnot je blíže popsáno v kapitole 3.1.5 Odvození vody pro závlahové účely.

$O_{n,t}$ je odtok z nádrže n v čase t v jednotkách m^3 za určený časový krok.

$$O_{n,t} = Z_{P,n,t} + MZP_{n,t} + O_{BP,n,t} + O_{V,n,t} + O_{Z,n,t} \quad (3.14),$$

kde $Z_{P,n,t}$ jsou ztráty průsakem z nádrže n v čase t v m^3 za určený časový krok. Jejich určení je blíže popsáno v kapitole 3.1.3 Odvození průsaku.

$MZP_{n,t}$ je minimální zůstatkový průtok pod nádrží n v čase t v m^3 za určený časový krok. Jeho určení je popsáno blíže v kapitole 3.1.6 Minimální zůstatkový průtok.

$O_{BP,n,t}$ je přepad přes bezpečnostní přeliv nádrže n v čase t v m^3 za určený časový krok. Hodnoty $O_{BP,n,t}$ jsou vypočteny na základě okrajové podmínky V_{max} uvedené na konci této kapitoly.

$O_{V,n,t}$ je zvolený přidaný odtok z nádrže n v čase t v m^3 za určený časový krok. Jeho stanovení je blíže popsáno v kapitole 3.5.1.2 Podmínky manipulačního řízení.

Dalším členem bilanční rovnice 3.12 je $O_{i,t}$ odtok z nádrže i v čase t v m^3 za určený časový krok, který je vypočten na základě stejného vztahu jako v rovnici 3.14 pro výpočet odtoku z nádrže n .

$$O_{i,t} = Z_{P,i,t} + MZP_{i,t} + O_{BP,i,t} + O_{V,i,t} + O_{Z,i,t} \quad (3.15),$$

Posledním členem bilanční rovnice 3.12 je $E_{i,t}$ ztráty výparem z nádrže i v čase t v m^3 za určený časový krok, které jsou blíže určeny v kapitole 3.1.4 Odvození výparu.

Okrajové podmínky výpočtu

Okrajové podmínky výpočtu ovlivňují odtok z nádrže O a závisí na bilanci objemu vody v nádrži V a mezních objemech V_{min} , V_{max} . V rámci výpočtu bylo V_{max} stanoveno hranou bezpečnostního přelivu a V_{min} hranou základové výpustě, neboť všechny nádrže ve studovaném povodí disponují pouze zásobním prostorem. Okrajové podmínky výpočtu jsou následující

$$V_t > V_{max} \quad (3.16),$$

$$\text{pak } V_t - V_{max} = O_{BP} \quad (3.17).$$

Zároveň platí, že

$$V_t < V_{min} \quad (3.18),$$

$$\text{pak } O_{i-1} = 0 \quad (3.19).$$

Pokud platí podmínka ve vztahu (3.18), pak nastává porucha zásobní funkce.

3.6. ENERGETICKÉ VYUŽITÍ VODNÍHO DÍLA COGOTÍ

Vytvořením simulačního modelu získáme informace o odtoku z nádrže a příslušné tlačné hladiny v daném časovém kroku. Tyto informace budou využity ke stanovení orientačního hydroenergetického potenciálu. Jelikož vytvořený model pracuje v časovém kroku průměrných měsíčních průtoků, podrobná analýza využitelnosti vodního díla k hydroenergetickým účelům není možná.

V rámci výpočtu bude uvažováno s instalací průběžné vodní elektrárny. Jelikož tento typ elektrárny nemění průtokový režim ani vlastnosti vody a odběry ze zásobního prostoru vodních děl uvažujeme jako nepřímé, průtok na turbínu vodní elektrárny bude uvažován jako suma odběrů O_Z , odtoku O_V . Vzhledem k nepřesnosti evidence získaných dat bylo nutno zavést pro hodnotu odtoku omezující podmínku. Získaná data uvádějí v některých případech složku odtoku O_V , jako součet s přepadem přes bezpečnostní přeliv O_{BP} . Z toho důvodu byla data limitována hranicí maximálního odtoku základovými výpustěmi, danou jejich maximální kapacitou $4,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ přepočtenou na maximální vypuštěný objem za měsíc.

Při známém průběhu odtoku $O_Z + O_V$ a hrubého spádu H za předpokladu konstantní hladiny dolní vody je možno počítat časový průběh průměrných výkonů vodní elektrárny na hřídeli P [W], tedy

$$P = \rho \cdot g \cdot (O_Z + O) \cdot H \cdot \eta \quad (3.20),$$

kde η je bezrozměrná hodnota účinnosti turbíny, ρ objemová hmotnost vody v jednotkách $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a g je gravitační zrychlení v $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Účinnost turbíny je uvažována na základě předpokladu použití Francisovy turbíny hodnotou 82 %. (15)

Dalším krokem vyhodnocení energetického potenciálu vodního díla bylo posouzení celkové roční výroby elektrické energie E_p [Wh], vypočtené jako součin výkonu P za čas provozu t , tzn.

$$E_p = P \cdot t \quad (3.21).$$

Ze souboru hodnot roční výroby, byla vyhodnocena průměrná roční výroba elektrické energie $\overline{E_p}$ za posuzované období, tzn.

$$\overline{E_p} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n E_{p,i} \quad (3.22).$$

Na základě zvoleného manipulačního scénáře byla vypočtena referenční hodnota průměrné roční výroby elektrické energie za posuzované období, ke které byly procentně vztaženy hodnoty ovlivněné výroby elektrické energie za posuzované období v jednotlivých variantách daných scénářů.

Z výsledného souboru hodnot byla sestrojena empirická čára překročení vztahem podle Čagodajeva (viz Rovnice 3.21). Data souboru s celkovým počtem hodnot n seřadíme v sestupném pořadí a každému z nich přiřadíme pořadové číslo m .

$$p' = \frac{m-0,3}{n+0,4} \cdot 100 \quad (3.23),$$

kde p' je pravděpodobnost dosažení a překročení m -tého členu v procentech. (16)

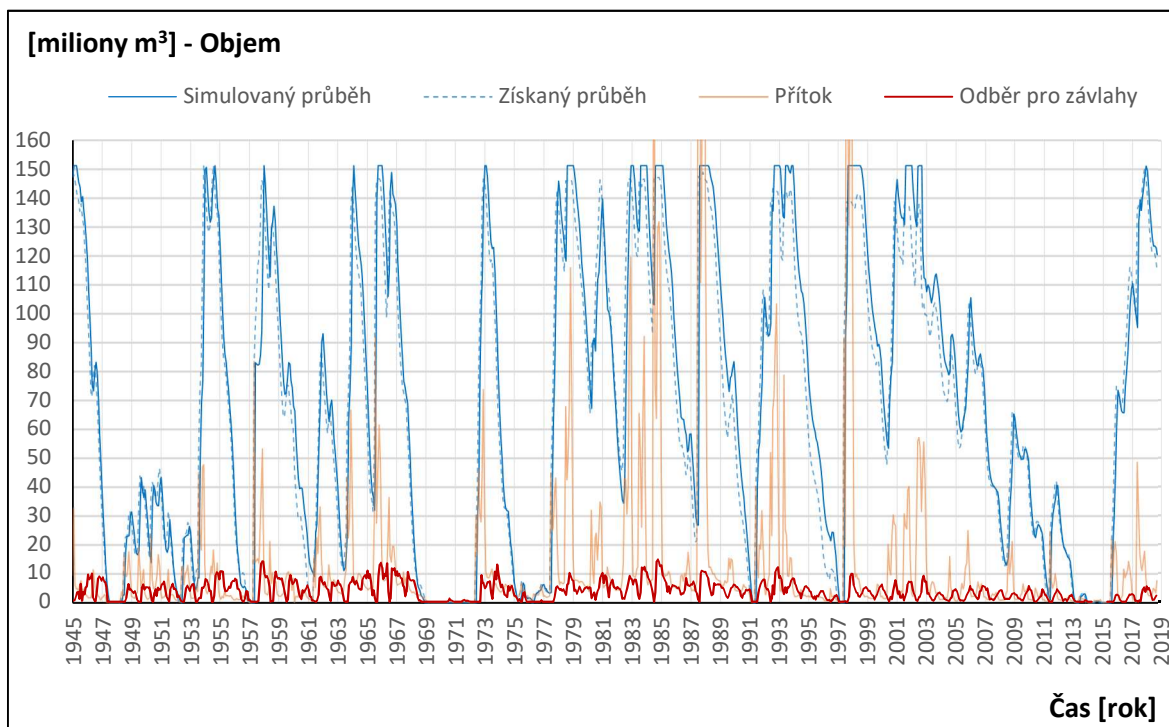
4. ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU VODNÍHO DÍLA COGOTÍ

Na základě analýzy vstupních hydrologických dat byl sestaven simulační model. Ověření výpočtu bylo provedeno porovnáním zabezpečení podle trvání a opakování (viz Tabulka

4.1) chronologických řad průběhů objemu vody v nádrži dat získaných a dat simulovaných (viz Graf 4.1).

Tabulka 4.1 – Zabezpečení zásobní funkce nádrže Cogotí pro řadu získanou a řadu simulovanou

Typ dat	P_t	P_o
	[%]	[%]
Získaný průběh	90,8	81,3
Simulovaný průběh	91,1	81,3



Graf 4.1 – Chronologické průběhy objemu vody v nádrži z dat získaných a dat simulovaných

Z tabulky 4.1 vychází, že zabezpečení podle opakování P_o jsou shodné a zabezpečení podle trvání P_t simulovaného průběhu se odchyluje od získaného průběhu o 0,3 %, a to z důvodu aproximace vstupních parametrů. Nejvýraznější odchylky nastávají vlivem předpokladu limitního maximálního odtoku základovými výpustěmi, stanoveného za účelem posouzení hydroenergetického potenciálu vodního díla, kdy ve vodních měsících dochází na rozdíl od získaných dat k úplnému naplnění zásobního prostoru nádrže. Tato odchylka je důsledkem výpočtu simulačního modelu v průměrných měsíčních průtokových hodnotách. Odchylka 0,3 % je zanedbatelná, proto je model považovaný za vyhovující. Důležitým poznatkem je skutečná zabezpečení vodního díla,

kteřá překračuje zvolenou minimální hranici zabezpečení podle trvání $P_t > 90 \%$. Dále je z průběhu evidentní, že charakter nádrže odpovídá víceletému řízení odtoku.

4.1. HYDROLOGICKÝ VÝVOJ V PROFILU NÁDRŽE COGOTÍ

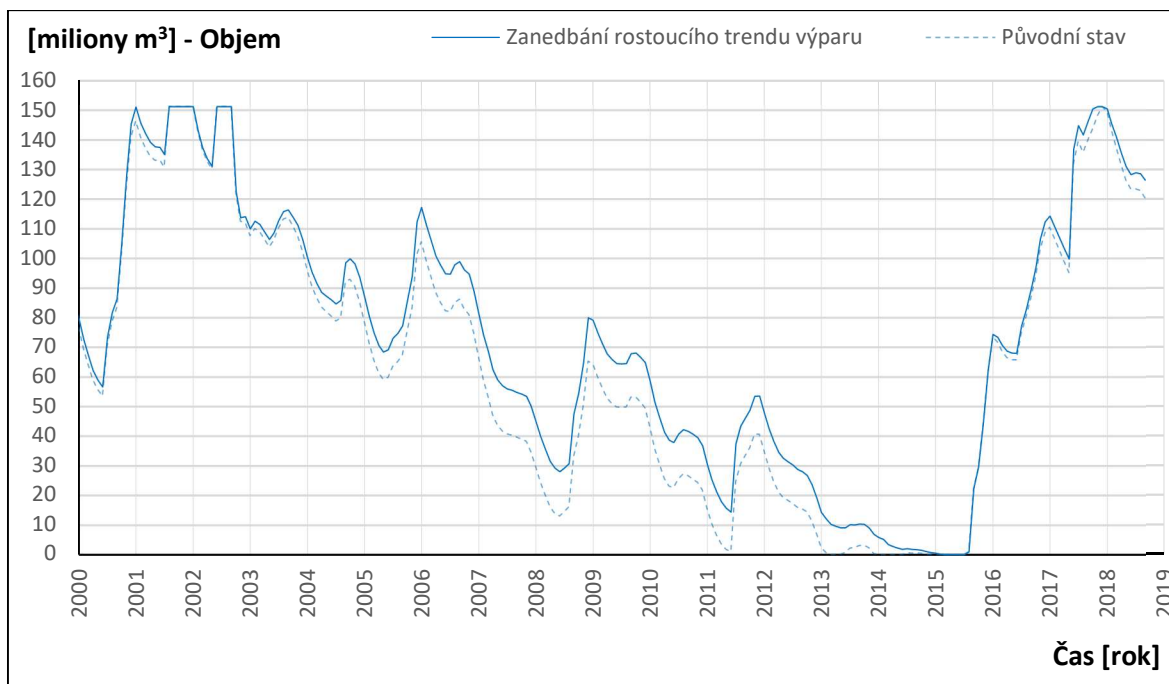
Analyzovaná reálná řada průtoků v letech 1945 – 2018 byla rozdělena v časovém kroku po přibližně 25 letech na suché a vodné období. Za účelem přiblížení hydrologického vývoje v posuzovaném profilu byly vypočteny průměrné hodnoty přítoku, odběru a výparu (viz Tabulka 4.2). Z tabulky je zřejmé, že rostoucí ztráty výparem a nižší průměrný průtok v posledních letech byl kompenzován nižšími odběry.

Tabulka 4.2 – Průměrné hodnoty bilančních parametrů ve zvolených časových úsecích

Časový úsek	Přítok	Odběr	Výpar
	[m ³ .s ⁻¹]	[m ³]	[m ³]
1945-1970	3,15	6 206 546	375 456
1970-1993	8,43	7 809 640	541 382
1993-2018	2,58	4 732 040	646 365

Zajímavým poznatkem je odlišnost průběhu objemu vody v nádrži v suchém období od roku 2003 – 2016, kde došlo k přizpůsobení odběrů nižším přítokům, na rozdíl od časového úseku 1945 – 1970, kde dochází k vyprázdnění nádrže v rozmezí dvou let (viz Graf 4.1).

Výpar je významnou složkou bilance vody v nádrži a jeho nárůst o téměř dvojnásobek od roku 1945 průběh objemu vody v nádrži znatelně postihuje. Pro posouzení jeho dopadu byl zvážěn scénář aplikace výparné výšky z roku 1945 v suchém období od roku 2003 (viz Graf 4.2).



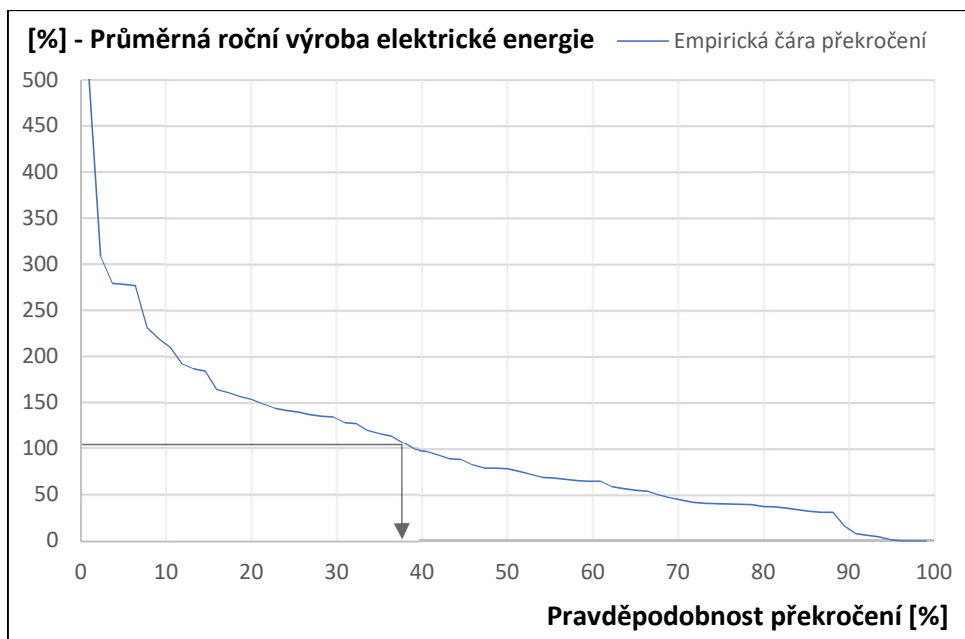
Graf 4.2 – Zanedbání nárůstu výparu mezi lety 2000 - 2018

Pokud bychom ve výpočtu neuvážili rostoucí trend výparu v celém časovém úseku mezi lety 1945 – 2018, pak celková zabezpečení dodávky vody vzroste na 93,3 %.

4.2. HYDROENERGETICKÝ POTENCIÁL VODNÍHO DÍLA

Hydroenergetický potenciál vodního díla byl posouzen na základě výpočtu průměrné roční výroby energie [kWh] uvážením průběhu hladiny vody v nádrži, realizovanými odběry závlahové vody a odtoky z nádrže, limitovány maximální kapacitou třech základových výpustí $13,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Uvažovaná potenciální maximální tlačná výška je 82,7 m. Vypočtená průměrná roční výroba elektrické energie současného stavu byla v rámci posouzení dopadů potenciálních vodních děl v povodí na zásobní funkci nádrže Cogotí použita jako referenční hodnota potenciálního hydroenergetického potenciálu hodnotou 100 %.

Na základě výsledných hodnot průměrné roční výroby elektrické energie E_P , byla sestrojena empirická čára překročení, (viz Graf 4.3).



Graf 4.3 – Empirická čára překročení průměrné roční výroby elektrické energie

Z grafu je zřejmé, že hodnota průměrné roční výroby elektrické energie 100 % je dosažena v 38 % z celkové časové řady 73 let.

Studie naznačují pokles roční produkce energie v důsledku klimatické změny přibližně o 13-18 %. Nové projekty pro výstavbu hydroelektráren, obzvláště v oblastech citlivých na klimatickou změnu, jakou jsou povodí závislá na tání sněhu, je proto pro ekonomické vyhodnocení nutné podrobné posouzení možných změn průtoků a hydrologického režimu v následujících letech. (17)

4.3. VARIANTNÍ VYHODNOCENÍ DOPADŮ NA ZÁSOBNÍ FUNKCI NÁDRŽE COGOTÍ

V následující etapě byla navržena řada manipulačních scénářů, které umožní nejlépe prošetřit dopady výstavby potenciálních vodních děl v povodí nádrže Cogotí. Hlavním úkolem uvažovaných nádrží je maximální využití místního průtoku ke kompenzaci části závlahových odběrů. Výpočtem je simulován možný dopad na zásobní funkci nádrže Cogotí v letech 1945 – 2018.

Byly navrženy celkem tři manipulační scénáře:

Návrhový manipulační scénář 1 je základní manipulační scénář podle návrhu správců povodí, blíže popsán v kapitole 4.3.2.

Návrhový manipulační scénář 2 respektuje dodržení limitní zabezpečení zásobní funkce vodních děl, blíže popsán je v kapitole 4.3.3.

Návrhový manipulační scénář 3 je dán rovnováhou mezi zabezpečeními vodních děl v jednotlivých variantách. Blíže popsán je v kapitole 4.3.4.

Každý manipulační scénář je uveden v sedmi variantách:

Varianta 1 – Existence vodní nádrže Cogotí

Varianta 2 – Existence vodních nádrží Cogotí a Valle Hermoso

Varianta 3 – Existence vodních nádrží Cogotí, Valle Hermoso a Murallas Viejas

Varianta 4 – Existence vodních nádrží Cogotí, Valle Hermoso, Murallas Viejas a Tranca

Varianta 5 – Existence vodních nádrží Cogotí, Valle Hermoso, Murallas Viejas a Curcita

Varianta 6 – Existence vodních nádrží Cogotí, Valle Hermoso a Tranca

Varianta 7 – Existence vodních nádrží Cogotí, Valle Hermoso a Curcita

4.3.1. PLÁNOVANÁ VODNÍ DÍLA V POVODÍ NÁDRŽE COGOTÍ

Postupy návrhu základních parametrů potenciálních vodních děl mají do značné míry shodné rysy. Hodnoty výparu a jeho vývoj v čase byl odvozen na základě vstupních hydrologických údajů v profilu přehrady Cogotí. Pro všechny profily platí předpoklad minimálních průsaků (cca 1 l.s^{-1}) zahrnutých v ekologickém průtoku pod hrází. Funkční prostor nádrží je s ohledem na jejich závlahový účel dělen pouze na zásobní a případně mrtvý prostor nádrže. Průtoková data byla v každém profilu odvozena hydrologickou analogií. Získané informace o zavlažovaných plochách v dílčích povodích byly extrapolovány na základě analýzy odběrů z nádrže Cogotí. Vzhledem k seismické aktivitě v dané oblasti je u všech přehrad uvažován rockfillový konstrukční typ hrází.

Vodní díla v povodí jsou navržena s ohledem na jejich topografické umístění, a proto objem zásobního prostoru V_{\max} je považován za potenciální maximálně možný. Návrh umožňuje posoudit limitní odběry v daném profilu.

Výsledné hodnoty základních parametrů vodních děl jsou uvedeny v následující tabulce 4.3.

Tabulka 4.3 – Přehledná tabulka parametrů vodních děl

Vodní dílo	A_P	V_{max}	H_{max}	L_k	Q_a	MZP	A_{OZ}
	[km ²]	[mil. m ³]	[m]	[m]	[m ³ .s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]	[ha]
Cogotí	1 601	150	82,7	160	5,02	-	12 000
Valle Hermoso	90	24	100,0	450	0,25	Viz Tabulka 3.2	1 700
Murallas Viejas	151	64	100,0	970	0,44	0,043	3 200
Tranca	481	18	60,0	270	1,81	0,181	4 900
Curcita	225	53	105,0	600	0,85	0,085	4 900

A_P ... Plocha dílčího povodí

V_{max} ... Maximální objem nádrže

H_{max} ... Maximální hladina hráze

L_K ... Délka koruny hráze

Q_a ... Dlouhodobý průměrný průtok

MZP ... Minimální zůstatkový průtok

A_{OZ} ... Plánované zavlažované plochy v povodí

Valle Hermoso se nachází na vodním toku Pama. Jako jediné vodní dílo je ve výstavbě a dokončení přehrady je plánováno na rok 2019. Maximální výška hráze 100 m, zahrnuje 16 m k hraně nátoku spodní výpustě, které tak vytvářejí mrtvý prostor nádrže za účelem možného využití objemu k akumulaci splavenin. Vzhledem k blížícímu se termínu dokončení stavby je vodní dílo uvažováno ve všech scénářích ovlivnění zásobní funkce nádrže Cogotí.

Murallas Viejas je vodní dílo plánované v povodí řeky Combarbalá a svým zásobním objemem 64 mil. m³ je největší potenciální nádrž v povodí.

Potenciální přehrady **Tranca** a **Curcita** tvoří kaskádu na vodním toku Cogotí. Nicméně vzhledem k podmínce jediné závlahové nádrže v povodí řeky Cogotí nejsou v žádném scénáři ovlivnění zásobní funkce nádrže Cogotí uvažovány obě přehrady zároveň.

Hlavní motivací seskupování samostatných nádrží do větších spolupracujících soustav je jednak větší spolehlivost jejich funkce, jednak získání většího efektu než jejich

izolované funkce. (12) Manipulace na jednotlivých vodních dílech je předmětem jejich posouzení.

4.3.2. POSOUZENÍ ZÁKLADNÍHO MANIPULAČNÍHO SCÉNÁŘE NA VODNÍCH DÍLECH

Z informací získaných v rámci terénního průzkumu byl vyhodnocen základní manipulační scénář navržený správcem na vodních dílech Cogotí a Valle Hermoso, kde přítok do zásobního prostoru nádrže Cogotí bude zajištěn omezující podmínkou limitního přítoku $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v daném profilu. Z podmínky plyne povinnost průtoky přesahující limitní hodnotu neakumulovat v zásobním prostoru nádrže Valle Hermoso. Vzhledem k charakteru vstupních dat nebylo možné návrhový scénář detailně modelovat, proto byla podmínka aproximována uvážením překročení průměrných měsíčních přítoků do nádrže.

Scénář bude variantně posouzen na základě možných kombinací potenciálních realizovaných vodních děl v povodí. Nároky na odběr závlahové vody bude uvažován v souladu se získanými informacemi z terénního průzkumu (viz Tabulka 4.3). Sledovanými výstupními parametry budou zabezpečení zásobní funkce nádrží podle trvání uvažovaných vodních děl a dopady daného variantního řešení na energetický potenciál nádrže Cogotí (viz Tabulka 4.4).

Tabulka 4.4 – Přehled výstupních hodnot základního manipulačního scénáře

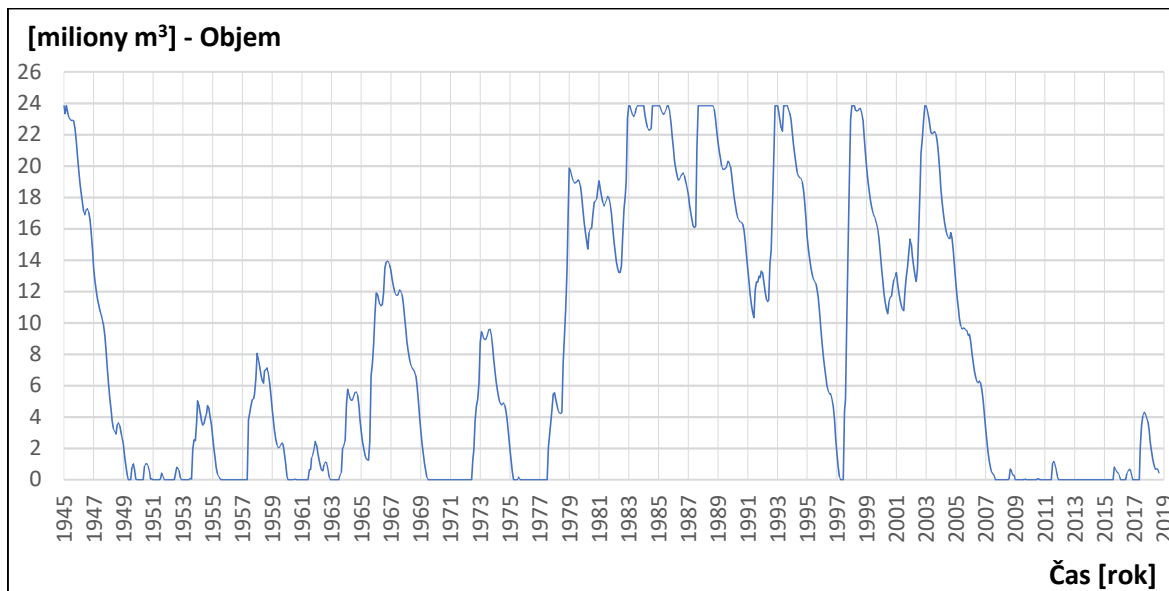
VD	Parametr	Jednotky	Číslo varianty řešení						
			1	2	3	4	5	6	7
Cogotí	P_t	%	91,1	88,9	84,5	71,2	76,5	76,4	81,3
	E_P	%	100	98,1	93,3	77,9	82,4	85,1	89,1
Valle Hermoso	P_t	%		73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3
	Z_P	ha		1700	1700	1700	1700	1700	1700
		%		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Murallas Viejas	P_t	%			78,2	78,2	78,2		
	Z_P	ha			3200	3200	3200		
		%			100,0	100,0	100,0		
Tranca	P_t	%				79,0		79,0	
	Z_P	ha				4900		4900	
		%				100,0		100,0	
Curcita	P_t	%					75,5		75,5
	Z_P	ha					4900		4900
		%					100,0		100,0

P_t ... Zabezpečení zásobní funkce vodního díla podle trvání.

E_p ... Průměrná roční výroba elektrické energie.

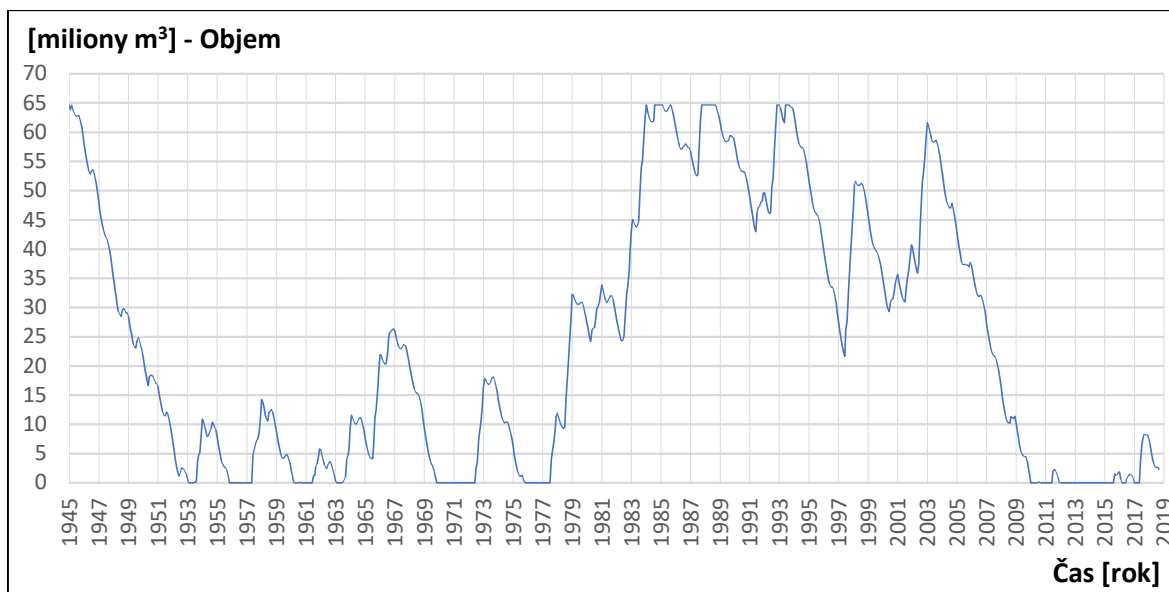
Z_p ... Zavlažovaná plocha [ha], Splnění požadavku na závlahy [%].

Žádné vodní dílo při posuzovaném způsobu manipulace nedosahuje na minimální požadovanou míru zabezpečení 90 %. Požadavek na zavlažování 1700 ha v povodí řeky Pama vodní dílo Valle Hermoso zajišťuje se zabezpečeností 73,3 %.



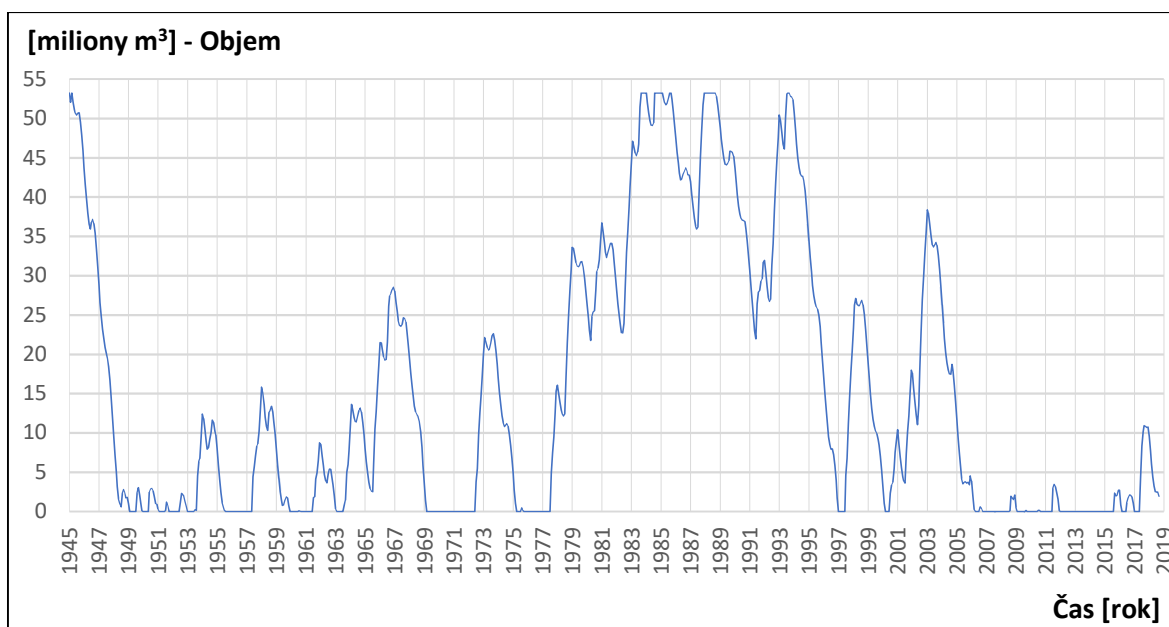
Graf 4.4 – Potenciální chronologický průběh zásoby vody ve vodním díle Valle Hermoso

Vodní dílo Murallas Viejas je svým zásobním objemem 64 milionů m³ největší z potenciálních nádrží, nicméně zavlažování 3200 ha v povodí řeky Combarbalá by bylo zajištěno pouze se zabezpečeností 78,2 %



Graf 4.5 – Potenciální chronologický průběh zásoby vody ve vodním díle Murallas Viejas

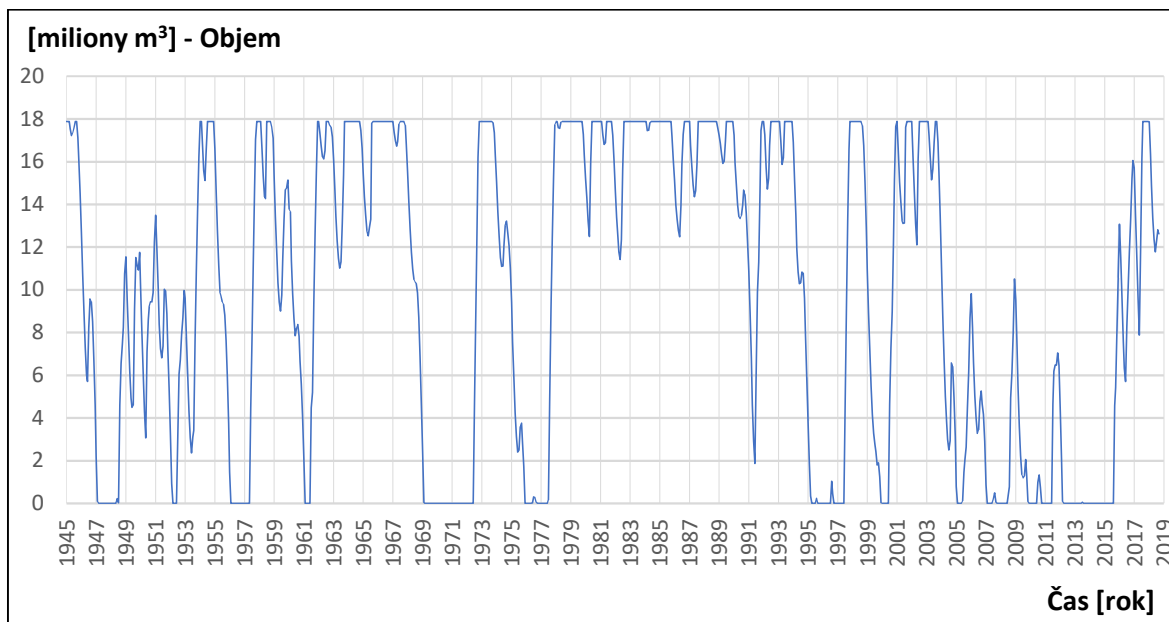
Přehrada Curcita je svým zásobním objemem 53 milionů m^3 v pořadí druhá největší, avšak plocha povodí 225 km^2 je výrazně menší, než plocha povodí 481 km^2 níže ležícího vodního díla Tranca. Z toho důvodu je zabezpečení zásobního prostoru 75,5 % pro požadavek na závlahy 4 900 ha v povodí řeky Cogotí nižší, než 79,0 % v nádrži s třetinovým zásobním objemem se stejným požadavkem na závlahy.



Graf 4.6 – Potenciální chronologický průběh zásoby vody ve vodním díle Curcita

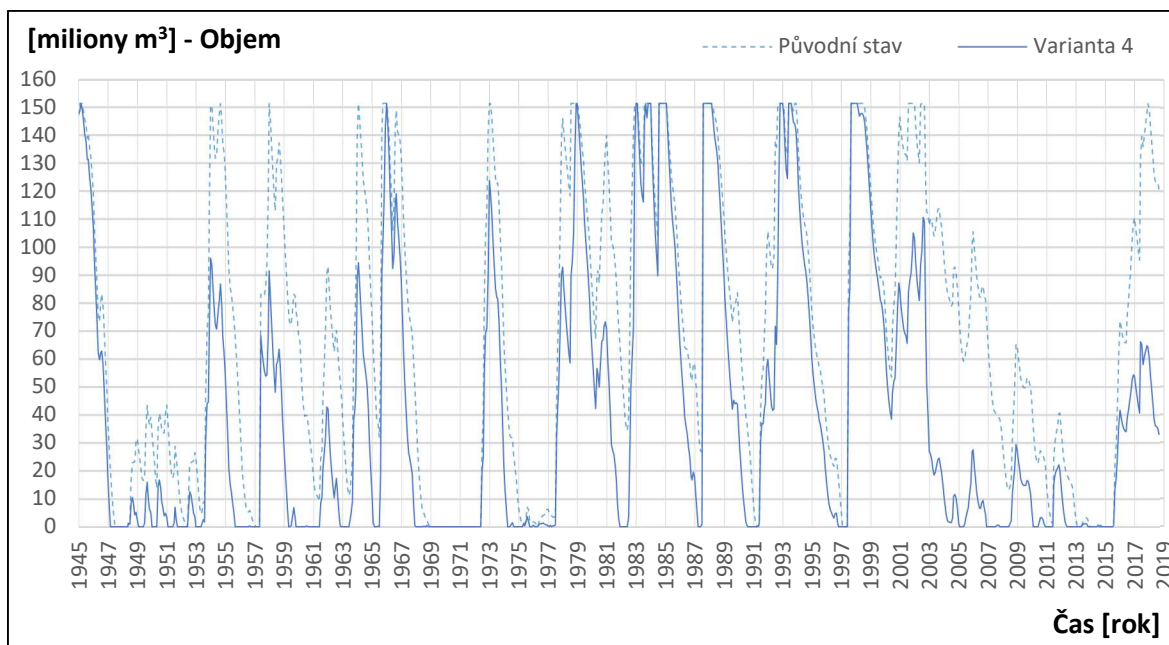
Profil přehrady Tranca je svým objemem 18 milionů m^3 nejmenší, avšak plochou povodí nádrže 481 km^2 , kterou naopak převyšuje ostatní posuzované profily, je zajištěn vyšší

průtok. Z toho důvodu je pro požadavek na závlahu 4 900 ha zajišťován se zabezpečeností 79,0 % srovnatelnou s profilem Murallas Viejas s trojnásobným zásobním objemem.



Graf 4.7 – Potenciální chronologický průběh zásoby vody ve vodním díle Tranca

Za předpokladu, že by byl realizován scénář č. 4, kde dopad na vodní dílo Cogotí je nejnepříznivější (viz Graf 4.8), pak zabezpečení zásobní funkce klesne o 19,8 %.

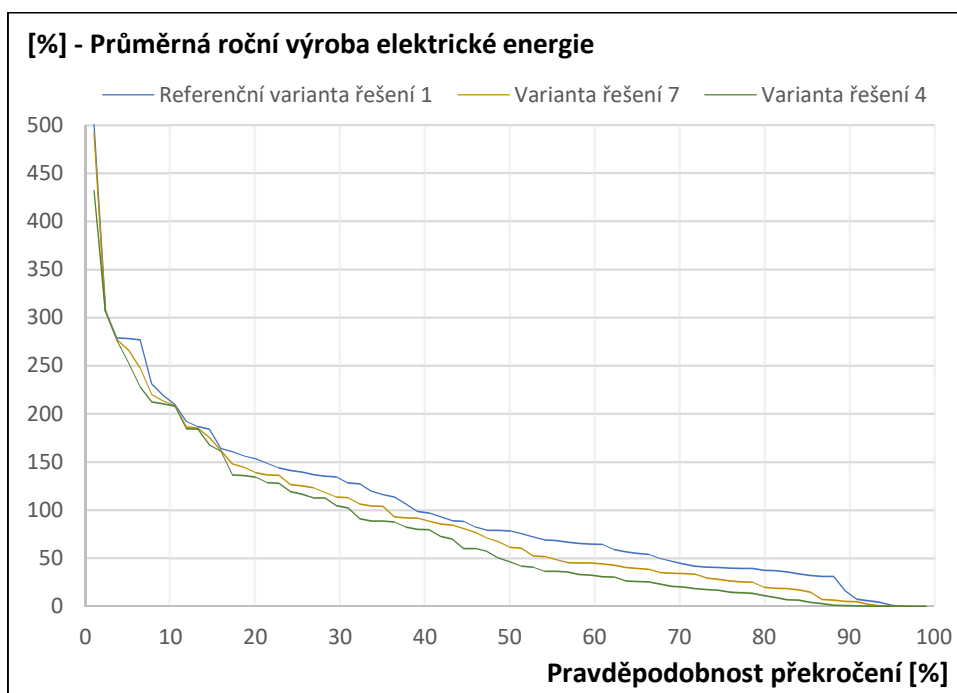


Graf 4.8 – Porovnání původního stavu a scénáře č. 4 na vodním díle Cogotí s nejnižší mírou zabezpečení na 71,3 %

Pokud nebude manipulace na jednotlivých vodních dílech bilancována a nepřistoupí-li se k řízení vodohospodářské soustavy jako celku tak, aby dosáhly větší spolehlivosti jejich

společné funkce, pak zabezpečení zásobního prostoru Cogotí klesne až na 71,3 %, tedy hluboko pod zvolenou hranici minimální zabezpečení 90 %.

Za účelem posouzení dopadu výstavby potenciálních vodních děl v povodí na hydroenergetický potenciál vodního díla Cogotí byl sestrojen graf empirických čar překročení průměrné roční výroby elektrické energie pro varianty řešení 1, 4 a 7 (viz Graf 4.9).



Graf 4.9 – Empirické čar překročení potenciální průměrné roční výroby elektrické energie na přehradě Cogotí

Hodnoty průměrné roční výroby elektrické energie uvedené v přehledu výstupních hodnot základního manipulačního scénáře (viz Tabulka 4.4) jsou vztaženy k referenční čáře překročení varianty 1 a uvádějí procentuální hodnotu celkového průměru roční výroby. Vyobrazené průběhy empirických čar varianty 7 a 4 popisují snížení produkce elektrické energie v daném manipulačním scénáři o 11 a 22 %.

4.3.3. STANOVENÍ MANIPULAČNÍHO SCÉNÁŘE PŘI DODRŽENÍ LIMITNÍ ZABEZPEČENOSTI

V rámci posouzení byly navrženy manipulační scénáře pro jednotlivé možné kombinace potenciálních realizovaných vodních děl v povodí. Stanovenou limitní podmínkou návrhu bylo dodržení zvolené minimální zabezpečení 90 % ve všech uvažovaných profilech.

Vyhodnocením získáme informace o dosažitelných zavlažovaných plochách v dílčích povodích (viz Tabulka 4.5).

Tabulka 4.5 - Přehled výstupních hodnot scénáře dodržení limitní zabezpečení

VD	Parametr	Jednotky	Číslo varianty řešení						
			1	2	3	4	5	6	7
Cogotí	Pt	%	91,1	90,2	90,2	90,2	90,1	90,2	90,2
	EP	%	100	98,4	96,6	94	95,1	96,4	96,5
	LH	m	0	-41	-19	-21	-12,5	-23	-13
Valle Hermoso	Pt	%		90,1	90,1	90,1	90,2	90,1	90,1
	Zp	ha		1050	665	642	388	745	457
		%		61,8	39,1	37,8	22,8	43,8	26,9
Murallas Viajes	Pt	%			90,1	90,1	90,1		
	Zp	ha			1780	1769	1345		
		%			55,6	55,3	42,0		
Tranca	Pt	%				90,1		90,1	
	Zp	ha				743		1040	
		%				15,2		21,2	
Curcita	Pt	%					90,1		90,1
	Zp	ha					1948		2140
		%					39,8		43,7
Σ Zavlažovaných ploch	ha		0	1050	2445	3154	3681	1785	2597
Počet nádrží	-		1	2	3	4	4	3	3

P_t ... Zabezpečení zásobní funkce vodního díla podle trvání.

E_p ... Průměrná roční výroba elektrické energie.

L_H ... Podmínka limitní hladiny v nádrži Cogotí vztažena k maximální hladině vody v nádrži H_{max} = 82,7 m.

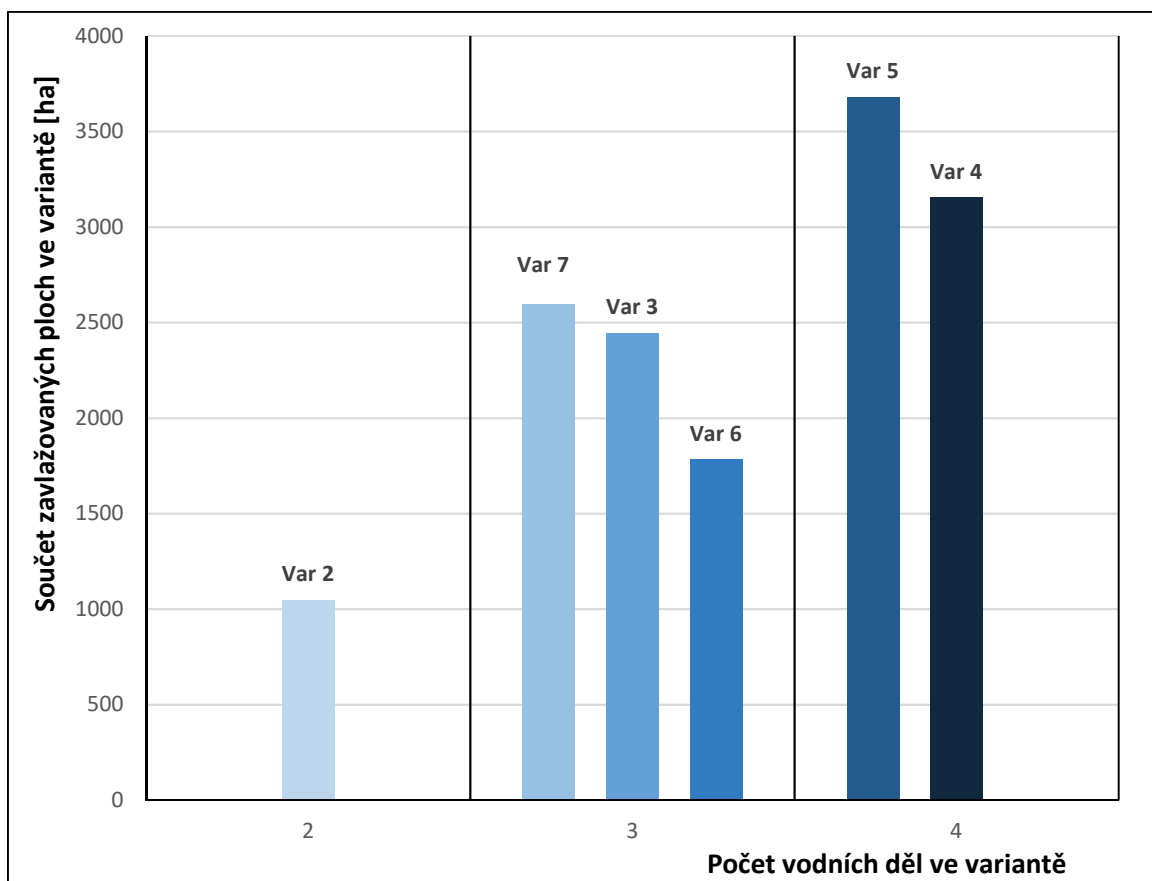
Z_p ... Zavlažovaná plocha [ha], Splnění požadavku na závlahy [%].

Dosažení limitní podmínky zvolené minimální zabezpečení bylo dosaženo nastavením manipulační podmínky limitní hladiny v nádrži Cogotí. Snižováním této hladiny je určována mezní hranice pro plnění vodních děl v jejím povodí.

Současný stav v povodí uvažující realizaci pouze vodního díla Valle Hermoso je zohledněn variantou řešení 2. Z výpočtu vyplývá, že je možné zajistit požadovanou zabezpečení 90 % v obou profilech stanovením manipulační podmínky limitní hladiny v nádrži Cogotí ve výšce 21,7 m nad hranou nátoky spodní výpustě, odpovídající přibližně zásobnímu

objemu 6,8 mil. m³, a snížením zavlažované plochy ze zásobního prostoru Valle Hermoso na 1050 ha, tedy 61,8 % z plánované zemědělsky obdělávané plochy v povodí řeky Pama.

Výstavba ostatních vodních děl v povodí klade vyšší nároky na dodržení mezní zabezpečení zásobního prostoru nádrže Cogotí. S rostoucí podmínkou limitní hladiny je snižován akumulovaný přítok v ostatních profilech. Z toho důvodu je snižován i zabezpečený odběr. Realizací doplňující závlahové nádrže klesá rozloha zemědělské půdy v povodí řeky Pama se zabezpečeným odběrem pod 50 % plánované plochy.



Graf 4.10 – Vyhodnocení manipulačního scénáře 2

Posouzením počtu vystavěných vodních děl a maximální možnou zavlažovanou plochou jednotlivých variant při zabezpečení 90 % (viz Graf 4.10) vychází jako nejvýhodnější následná výstavba profilu nádrže Curcita o množství možné zavlažované plochy 2 597 ha. I tak se jedná o pokrytí pouze 43,7 % původní plánované závlahové potřeby. Při realizaci Curcity (varianta 7) a zachování zabezpečení 90 % klesne zavlažovaných ploch na Valle Hermoso o 43,5 % oproti variantě 2.

V případě realizace čtyř profilů se jako nejvýhodnější kombinace jeví výstavba přehrad Curcita a Murallas Viejas s možnou zavlažovanou plochou 3 681 ha při zabezpečení 90 %.

4.3.4. STANOVENÍ MANIPULAČNÍHO SCÉNÁŘE ZAJIŠTJÍCÍHO ROVNOVÁHU MEZI ZABEZPEČENOSTMI VODNÍCH DĚL

Manipulace na vodních dílech je stanovena s ohledem na maximalizaci zavlažovaných ploch při dodržení podmínky rovnováhy mezi zabezpečeními jednotlivých vodních děl. Navrhované scénáře umožňují posoudit potenciální vhodné kombinace výstavby vodních děl v povodí při zanedbání zvolené mezní hodnoty zabezpečení.

Tabulka 4.6 - Přehled výstupních hodnot scénáře rovnováhy mezi zabezpečeními

VD	Parametr	Jednotky	Číslo varianty řešení						
			1	2	3	4	5	6	7
Cogotí	Pt	%	91,1	89,7	85,3	71,2	74,7	75,7	81,6
	EP	%	100	98,3	93,7	81,7	83,2	86,8	89,0
Valle Hermoso	Pt	%		89,7	85,3	71,2	74,7	75,7	81,6
	Zp	ha		1089	1210	1700	1665	1605	1345
		%		64,1	71,2	100,0	97,9	94,4	79,1
O	l.s ⁻¹		0	0	6,8	0	0	0	
Murallas Viejas	Pt	%			85,3	71,2	74,7		
	Zp	ha			2790	3200	3200		
		%			87,2	100,0	100,0		
O	l.s ⁻¹			0	67	39			
Tranca	Pt	%				71,2		75,7	
	Zp	ha				4900		4900	
		%				100,0		100,0	
O	l.s ⁻¹				188		99		
Curcita	Pt	%					71,0		81,6
	Zp	ha					4900		4740
		%					100,0		96,7
	O	l.s ⁻¹					0		0
Σ Zavlažovaných ploch	ha		0	1089	4000	9800	9765	6505	6085

P_t ... Zabezpečení zásobní funkce vodního díla podle trvání

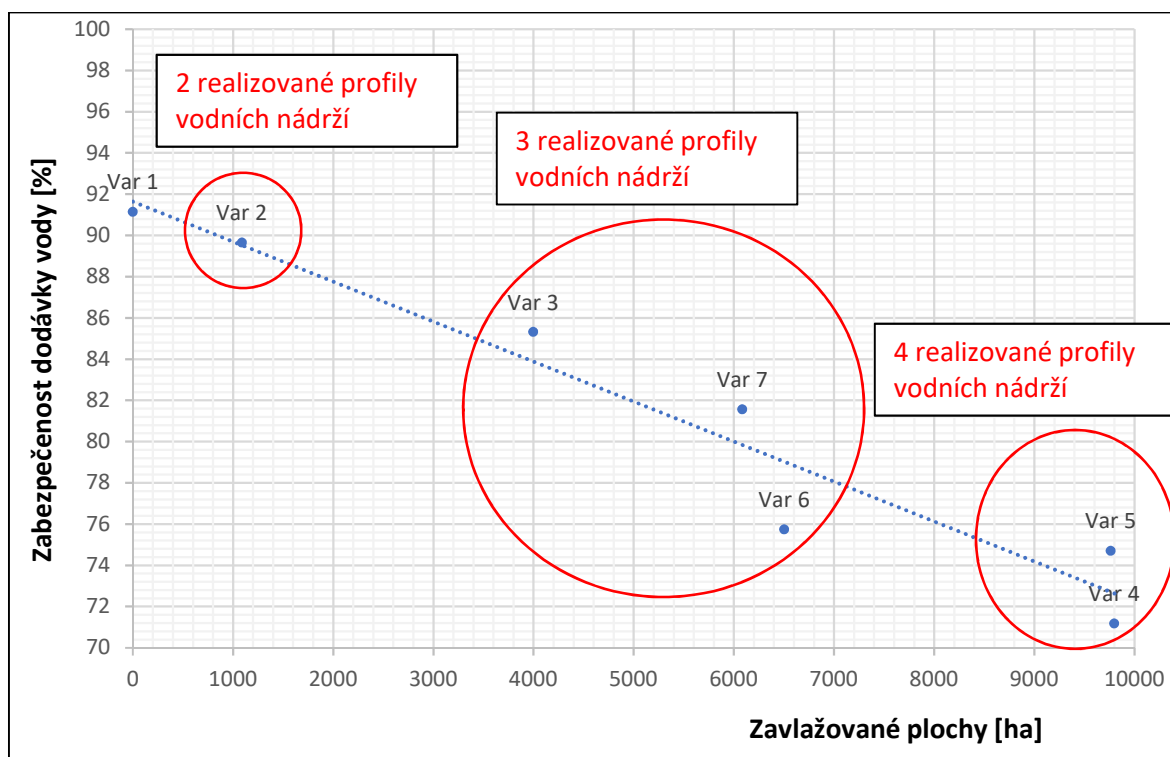
E_p ... Průměrná roční výroba elektrické energie

Z_p ... Zavlažovaná plocha [ha], Splnění požadavku na závlahy [%]

O ... Odtok z nádrže nad rámec požadovaných odběrů

Podmínka manipulačního scénáře byla dodržena na zvýšení odtoku ze zásobního prostoru nad rámec požadovaných odběrů v povodí zvolených vodních děl, čímž dochází k nadlepšování zásobního objemu v nádrži Cogotí.

Jedním ze zajímavých posuzovaných scénářů se jeví varianta 3, která uvažuje s výstavbou vodních děl Valle Hermoso a Murallas Viejas. Pokud by bylo přistoupeno na snížení požadavku limitní zabezpečení zásobního prostoru ve třech posuzovaných profilech pouze o 5 %, pak je možné s 85 % zabezpečení zajistit odběry pro 71 % plánovaných zavlažovaných ploch v povodí řeky Pama a 87 % zavlažovaných ploch v povodí řeky Combarbalá.



Graf 4.11 - Vyhodnocení manipulačního scénáře 3

Posouzením závislosti dosaženého zabezpečení variant a sumy zavlažovaných ploch (viz Graf 4.11) je možné na křivce trendu sledovat míru poklesu zabezpečení soustavy s vyšší zavlažovanou plochou a vyšším počtem realizovaných profilů průměrně s nárůstem celkové zavlažované plochy o 1 000 ha se zabezpečení soustavy sníží o 1,4 %.

V případě posouzení výstavby dalšího, třetího, profilu nádrže v tomto manipulačním scénáři zajišťujícím rovnováhu mezi zabezpečeními vodních děl se jeví znovu jako

nejvýhodnější profil Curcita v kombinaci s mírou zabezpečení celé soustavy 81,6 % a zavlažovanou plochou 6 085 ha.

5. ZÁVĚR

Závěrem budou shrnuty podstatné výstupy diplomové práce.

Na základě získaných dat byla bilančně odvozena 73 let dlouhá řada reálných průměrných měsíčních průtoků, vyhodnoceny odběry vody pro závlahy, výpary v povodí a batygrafické čáry nádrže. Ze získaných údajů chronologického průběhu objemu vody v nádrži byla stanovena současná zabezpečení dodávky vody z nádrže Cogotí na 90,8 %. Dále je z průběhu evidentní, že charakter nádrže odpovídá víceletému řízení odtoku. Analyzovaná data byla použita k vytvoření simulačního modelu. Porovnáním výsledné zabezpečení simulovaného průběhu 91,1 % s vyhodnocenou zabezpečení ze získaných dat byla ověřena funkčnost modelu.

Vypočtená průměrná roční výroba elektrické energie současného stavu byla použita jako referenční hodnota při vyhodnocování dopadu výstavby potenciálních vodních děl v povodí na funkci přehrady Cogotí. Vzhledem k nutnosti zachování nezbytného stupně mlčenlivosti určeného podmínkou při obdržení vstupních hydrologických dat jsou hodnoty průměrné roční výroby elektrické energie uvedeny v procentech, kde referenční hodnota se rovná 100 %. Ze sestrojené empirické čáry překročení je zřejmé, že hodnota průměrné roční výroby elektrické energie 100 % je dosažena v 38 % z celkové časové řady 73 let.

Dále byly do modelu zahrnuty potenciální vodní díla v povodí. Odvozená hydrologická data v potenciálních profilech nádrží byla verifikována na měřených datech a vykazují uspokojivou závislost. Vytvořeným simulačním modelem vodohospodářské soustavy byly vyhodnoceny variantní dopady na hydroenergetický potenciál vodního díla Cogotí a zabezpečení zásobní funkce realizovaných i potenciálních vodních děl v povodí. Variantním nastavením manipulačního řízení odtoku v jednotlivých uvažovaných profilech byly vyhodnoceny tři návrhové scénáře, každý v sedmi variantách pro možné kombinace realizovaných vodních děl.

Návrhový manipulační scénář 1 – Základní manipulační scénář podle návrhu správců povodí

Nadlepšování zásobního objemu nádrže Cogotí byla zajišťována omezující podmínkou limitního maximálního přítoku do zásobního prostoru dílčích nádrží $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Potenciální vodní díla zajišťují maximální požadavky na závlahy v příslušných povodích.

V žádné variantě není vodní dílo, které by při posuzovaném způsobu manipulace dosahovalo zvolenou minimální požadovanou míru zabezpečení 90 %. Pokud nebude manipulace na jednotlivých vodních dílech optimalizována a nepřístupí-li se k řízení vodohospodářské soustavy jako celku tak, aby dosáhly větší spolehlivosti jejich společné funkce, pak zabezpečení zásobního prostoru Cogotí může klesnout až na 71,3 %, tedy hluboko pod zvolenou hranici minimální zabezpečení 90 %.

Dopad výstavby potenciálních vodních děl na hydroenergetický potenciál vodního díla Cogotí byl popsán průběhy empirických čar překročení (viz Graf 4.9), které vykazaly možný pokles potenciální průměrné roční výroby elektrické energie o 22 % v celém sledovaném časovém úseku 73 let.

Návrhový manipulační scénář 2 – Dodržení limitní zabezpečení zásobní funkce vodních děl

Stanovenou limitní podmínkou pro návrh manipulačního scénáře bylo dodržení zvolené minimální zabezpečení 90 % ve všech uvažovaných profilech.

Z výpočtu simulačního modelu vyplývá, že v současné době dokončované vodní dílo Valle Hermoso umožňuje s 90 % zabezpečení zajistit pouze 61,8 % z požadovaného odběru pro závlahy v povodí řeky Pama.

Dalším závěrem z vypočtených hodnot scénáře 2 je, že pokud by bylo uvažováno o stavbě další vodní nádrže s mírou zabezpečení 90 %, jako nejvýhodnější se jeví výstavba nádrže Curcita (varianta 7), která zvýší celkovou zavlažovanou plochu z 1 050 ha (varianta 2) na 2 597 ha. Nevýhodou této varianty 7 je snížení závlahové plochy nádrže Valle Hermoso až o 43,5 % z varianty 2.

Návrhový manipulační scénář 3 – Rovnováha mezi zabezpečeními vodních děl

Manipulace na vodních dílech je stanovena s ohledem na maximalizaci zavlažovaných ploch při dodržení podmínky rovnováhy mezi zabezpečeními jednotlivých vodních děl.

Z vypočtených dat scénáře 3 je patrné, že při zvýšení celkové zavlažované plochy o 1 000 ha v povodí se zabezpečenosť soustavy nádrží sníží o 1,4 %.

V případě posouzení výstavby dalšího, třetího, profilu nádrže v manipulačním scénáři 3 zajišťujícím rovnováhu mezi zabezpečovacími vodními děl se jeví znovu jako nejvýhodnější profil Curcita (varianta 7) v kombinaci s mírou zabezpečení celé soustavy 81,6 % a zavlažovanou plochou 6 085 ha.

Závěrem práce je nutné podotknout, že všechny stanovené cíle v úvodu potažmo v zadání práce byly splněny.

CITOVANÁ LITERATURA

1. **Verdugo, R. a Peters, G.** Observed seismic behavior of three Chilean large dams. *ResearchGate*. [Online] 2009. [Citace: 03. 01. 2019.] Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/329541996_Observed_seismic_behavior_of_three_Chilean_large_dams?fbclid=IwAR1xo7PvFcdIc2uIgaJ-mxhdK5X9s0Z1VrJbUnPR_TdYzj7_-N-W3MaleZs. ISBN 978-0-415-80484-4.
2. **Lloyd, John W.** The hydrogeology and water supply problems in north-central Chile. *Scholar Space*. [Online] Leden 1976. [Citace: 03. 01. 2019.] Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10125/1534>. ISSN 0030-8870.
3. **VICUÑA, Sebastian, GERREAUD, René D. a MCPHEE, James.** Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change*. [Online] 2011, 105(3-4), 469-488. [Citace: 03. 01. 2019.] Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10584-010-9888-4>. DOI: 10.1007/s10584-010-9888-4. ISSN 0165-0009.
4. **VICUÑA, Sebastian, MCPHEE, James a GARREAUD, René D.** Agriculture Vulnerability to Climate Change in a Snowmelt-Driven Basin in Semiarid Chile. *Journal of Water Resources Planning and Management*. [Online] 2012, 138(5), 431-441. [Citace: 03. 01. 2019.] Dostupné z: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29WR.1943-5452.0000202>. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000202. ISSN 0733-9496.
5. **Anon.** Los motivos por los que fue postergada la habilitación de cortina inflable en Embalse Cogotí. *Ovalle Hoy*. [Online] 2018. [Citace: 03. 01. 2019.] Dostupné z: <https://ovallehoy.cl/los-motivos-por-los-que-fue-postergada-la-habilitacion-de-cortina-inflable-en-embalse-cogoti/>.
6. **Miranda, Cipriano.** *správce vodního díla Cogotí*. Embalse Cogotí, 17. 10. 2018.
7. **ICOLD.** Concrete face rockfill dams concepts for design and construction ICOLD committee on materials for fill dams. *DocPlayer*. [Online] November 2004. [Citace: 03. 01. 2019.] Dostupné z: https://docplayer.net/30181168-Concrete-face-rockfill-dams-concepts-for-design-and-construction-icold-committee-on-materials-for-fill-dams.html?fbclid=IwAR2ZU9dAM__2b_GvuxLSeQLu0CQ_C9pXSomISIk9KU1StDAQH7ZWbMGqzSg.

8. **Mapy.cz.** *Mapy.cz.* [Online] 14. 12. 2018. [Citace: 03. 01. 2019.] Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=-71.0002418&y=-31.1124814&z=12>.
9. **Nacional, Biblioteca Del Congreso.** Información Territorial. [Online] [Citace: 03. 01. 2019.] Dostupné z: https://www.bcn.cl/siit/mapas_vectoriales?fbclid=IwAR22S3qV_0ITFXy0JAdj7k9JQWCulCWsnHWOvrp0-ci6Cy7utaWIKvnq3xY.
10. **LTDA., MN Ingenieros.** Diseño construcción embalse Valle Hermoso, río Pama, comuna de Combarbalá, región de Coquimbo. *Borrador informe final.* DVH-IE-09-A.
11. **AMBIENTE, MINISTERIO DEL MEDIO.** Biblioteca Del Congreso Nacional. *Decreto 14.* [Online] 15. 01. 2015. [Citace: 03. 01. 2019.] Dostupné z: https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1053200&fbclid=IwAR3eQ9h5fr7I3UchvDuKEQMvqefUBGejEPUQy1drWvbJgxL6nKBY_wIemQ0.
12. **Patera, A., Nacházel, K. a Fošumpaur, P.** *Nádrže a vodohospodářské soustavy 10.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02620-5.
13. **Votruba, L. a Broža, V.** *Hospodaření s vodou v nádržích: vysokoškolská příručka.* Praha : SNTL, 1966. Řada stavební literatury.
14. . ČSN 75 2405. *Vodohospodářská řešení vodních nádrží.* Praha : Český normalizační institut, 2017.
15. **Anon.** *Abeceda malých vodních pohonů.* [Online] 19. 02. 2007. [Citace: 03. 01. 2019.] Dostupné z: <http://mve.energetika.cz>.
16. **KEMEL, Miroslav.** *Klimatologie, meteorologie, hydrologie.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01456-8.
17. **MCPHEE, James, a další.** An Approach to Estimating Hydropower Impacts of Climate Change from a Regional Perspective. *In: Watershed Management.* [Online] 22. 11. 2010. [Citace: 03. 01. 2019.] Dostupné z: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/41143%28394%292>. DOI: 10.1061/41143(394)2. ISBN 9780784411438.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 – Lokalizace zájmové oblasti vyznačené červeným polem	4
Obr. 1.2 – Přehledná situace	6
Obr. 1.3 – Přehledná situace přehrady Cogotí (1)	7
Obr. 1.4 – Bezpečnostní přeliv s pohyblivým vakovým uzávěrem	8
Obr. 2.1 – Doplnující měrné profily	10
Obr. 3.1 – Schéma systému posuzované vodohospodářské soustavy v povodí nádrže Cogotí	29
Obr. 3.2 – Blokové schéma bilanční rovnice soustavy nádrží	31

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 – Požadavky na závlahy (6)	9
Tabulka 3.1 – Vzorový rok se získanými daty	12
Tabulka 3.2 – Minimální zůstatkový průtok v profilu vodního díla Valle Hermoso (10)	20
Tabulka 3.3 – Minimální zůstatkový průtok na základě průměrného dlouhodobého průtoku	21
Tabulka 3.4 – Ověření průměrného dlouhodobého průtoku	24
Tabulka 3.5 – Doporučené zabezpečení podle trvání (14)	28
Tabulka 4.1 – Zabezpečení zásobní funkce nádrže Cogotí pro řadu získanou a řadu simulovanou	34
Tabulka 4.2 – Průměrné hodnoty bilančních parametrů ve zvolených časových úsecích	35
Tabulka 4.3 – Přehledná tabulka parametrů vodních děl	39
Tabulka 4.4 – Přehled výstupních hodnot základního manipulačního scénáře	40
Tabulka 4.5 - Přehled výstupních hodnot scénáře dodržení limitní zabezpečení	45
Tabulka 4.6 - Přehled výstupních hodnot scénáře rovnováhy mezi zabezpečeními	47

SEZNAM GRAFŮ

Graf 3.1 - Chronologický průběh zásoby vody v nádrži Cogotí	12
Graf 3.2 – Odvození čáry zatopených objemů	13
Graf 3.3 – Odvození čáry zatopených ploch	14
Graf 3.4 – Odvození průsaku	15
Graf 3.5 – Vyhodnocené průsaky vodních děl Valle Hermoso (vlevo nahoře), Murallas Viejas (vpravo nahoře), Curcita (vlevo dole) a Tranca (vpravo dole)	16
Graf 3.6 – Rostoucí trend výparu na přehradě Cogotí v jednotlivých měsících, kde na svislé ose je uvedena výparná výška a na vodorovné je uveden čas	17
Graf 3.7 – Potřeba vody v měsíci na 1 hektar v semiaridní oblasti provincie Limarí	18
Graf 3.8 – Odběry vody pro závlahy v dílčích povodích nádrže Cogotí	19
Graf 3.9 – Hydrologická analogie pro zvolené období 1980-2000	22
Graf 3.10 – Porovnání odpovídajících řad v profilu řeky Cogotí, ověření korelační závislosti průtoků	23
Graf 3.11 – Porovnání odpovídajících řad v profilu řeky Pama, ověření korelační závislosti průtoků	24
Graf 3.12 – Vyhodnocené batygrafické čáry vodních děl Valle Hermoso (vlevo nahoře), Murallas Viejas (vpravo nahoře), Curcita (vlevo dole) a Tranca (vpravo dole)	26
Graf 4.1 – Chronologické průběhy objemu vody v nádrži z dat získaných a dat simulovaných	34
Graf 4.2 – Zanedbání nárůstu výparu mezi lety 2000 - 2018	36
Graf 4.3 – Empirická čára překročení průměrné roční výroby elektrické energie	37
Graf 4.4 – Potenciální chronologický průběh zásoby vody ve vodním díle Valle Hermoso	41
Graf 4.5 – Potenciální chronologický průběh zásoby vody ve vodním díle Murallas Viejas	42
Graf 4.6 – Potenciální chronologický průběh zásoby vody ve vodním díle Curcita	42

Graf 4.7 – Potenciální chronologický průběh zásoby vody ve vodním díle Tranca	43
Graf 4.8 – Porovnání původního stavu a scénáře č. 4 na vodním díle Cogotí s nejnižší mírou zabezpečení na 71,3 %	43
Graf 4.9 – Empirické čáry překročení potenciální průměrné roční výroby elektrické energie na přehradě Cogotí	44
Graf 4.10 – Vyhodnocení manipulačního scénáře 2	46
Graf 4.11 - Vyhodnocení manipulačního scénáře 3	48